ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАДЗОРУ ЗА БЕЗОПАСНЫМ ВЕДЕНИЕМ РАБОТ
В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ
(ГОСАТОМЭНЕРГОНАДЗОР СССР)

ПРАВИЛА И НОРМЫ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Утверждены
Государственным комитетом СССР по использованию атомной энергии

Утверждены
Государственным комитетом СССР по надзору за безопасным ведением работ в атомной энергетике

# НОРМЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПНАЭ Г-7-002-86

*Обязательны для всех министерств, ведомств, организаций и предприятий, проектирующих, конструирующих, изготавливающих и эксплуатирующих атомные электростанции, теплоцентрали, опытные и исследовательские ядерные реакторы и установки, подконтрольные Госатомэнергонадзору СССР*

Введены в действие 01.07.87 г. с изменениями



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1989

gost.e-ecolog.ru

ББК 31.4
Н 83
УДК 621.039(083.74)

Серия основана в 1987 году

**Нормы** расчета на прочность оборудования и
Н83 трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 525 с.— (Правила и нормы в атомной энергетике).

Нормы содержат основную часть и рекомендуемые приложения. В основной (обязательной) части приведены: расчет по выбору основных размеров; расчет на статическую прочность, устойчивость, циклическую прочность, сопротивление хрупкому разрушению, длительную статическую прочность, длительную циклическую прочность, прогрессирующее формоизменение, сейсмические воздействия, вибропрочность; методики определения механических свойств и испытаний для определения характеристик прочности.

$\text{Н}\frac{2205000000\text{-}537}{051(01)\text{-}89}$ КБ-16-14-88 ББК 31.4

© Издательство «Металлургия», 1973
© Переработанное и дополненное. Энергоатомиздат, 1989

## СОДЕРЖАНИЕ


Основные условные обозначения ..... 9

1. Общие положения ..... 14

1.1. Область распространения норм ..... 14
1.2. Принципы, положенные в основу норм ..... 14

2. Основные определения ..... 18

3. Допускаемые напряжения, условия прочности и устойчивости ..... 21

4. Расчет по выбору основных размеров ..... 24
4.1. Общие положения ..... 24
4.2. Определение толщин стенок элементов оборудования и трубопроводов ..... 26
4.3. Коэффициенты снижения прочности и укрепление отверстий ..... 32
4.4. Фланцы, нажимные кольца и крепежные детали ..... 44

5. Поверочный расчет ..... 45

5.1. Общие положения ..... 45
5.2. Классификация напряжений ..... 46
5.3. Порядок определения напряжений ..... 48
5.4. Расчет на статическую прочность ..... 67
5.5. Расчет на устойчивость ..... 68
5.6. Расчет на циклическую прочность ..... 77
5.7. Расчет на длительную циклическую прочность ..... 92
5.8. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению ..... 93
5.9. Расчет на длительную статическую прочность ..... 112
5.10. Расчет на прогрессирующее формоизменение ..... 114
5.11. Расчет на сейсмические воздействия ..... 115
5.12. Расчет на вибропрочность ..... 119

*Приложение 1* (обязательное). **Физико-механические свойства конструкционных материалов** ..... 120

*Приложение 2* (обязательное). **Методы определения механических свойств конструкционных материалов** ... 191

1. Дополнительные понятия и определения ... 191
2. Методы испытания на растяжение ... 191
3. Методы испытания на ползучесть ... 192
4. Методы испытания на длительную прочность ... 192
5. Методика определения критической температуры хрупкости ... 193

5.1. Общие положения ... 193
5.2. Отбор проб для изготовления образцов ... 193
5.3. Ориентация образцов ... 194
5.4. Методика проведения испытаний на ударный изгиб ... 195
5.5. Определение критической температуры хрупкости ... 196

6. Методика определения сдвига критической температуры хрупкости вследствие термического старения ... 199

6.1. Общие положения ... 199
6.2. Проведение испытаний и обработка результатов ... 200

7. Методика определения сдвига критической температуры хрупкости вследствие накопления усталостных повреждений ... 201

7.1. Общие положения ... 201
7.2. Проведение испытаний ... 202

8. Методика определения сдвига критической температуры хрупкости вследствие влияния облучения и коэффициента радиационного охрупчивания ... 203

8.1. Общие положения ... 203
8.2. Облучение образцов ... 203
8.3. Проведение испытаний и обработка результатов ... 205

9. Методы испытаний на усталость ... 206

9.1. Общие положения ... 206
9.2. Малоцикловая усталость ... 208
9.3. Многоцикловая усталость ... 211
9.4. Длительная циклическая прочность ... 213
9.5. Циклическая прочность сварных соединений и металла с наплавкой ... 214
9.6. Циклическая прочность основных материалов, сварных соединений и металла с наплавкой в коррозионных средах ... 215
9.7. Влияние облучения на циклическую прочность основных материалов, сварных соединений и металла с наплавкой ... 220

10. Методы технологических испытаний металлов ... 222

10.1. Метод испытаний на изгиб ... 222
10.2. Трубы. Методы испытаний на изгиб ... 222
10.3. Трубы. Метод испытаний на сплющивание ... 223

11. Сварные соединения. Методы определения механических свойств 223

*Приложение 3* (рекомендуемое). **Унифицированные методы расчетного и экспериментального определения напряжений, деформаций, перемещений и усилий** ... 226

Условные обозначения ... 226
1. Основные положения ... 228
2. Расчет напряжений, перемещений и усилий в осесимметричных конструкциях из тонкостенных оболочек, пластин и колец при осесимметричной нагрузке ... 228

2.1. Правило знаков ... 228
2.2. Элементы оболочек вращения при действии внутреннего давления, температурных нагрузок и краевых усилий ... 229
2.3. Круглые пластины при действии силовых и температурных нагрузок ... 250
2.4. Кольцевые детали при действии силовых и температурных нагрузок ... 269
2.5. Составные конструкции ... 269

3. Расчет напряжений и перемещений в осесимметричных толстостенных элементах конструкций ... 270
4. Расчет местных напряжений в элементах конструкций ... 270
5. Экспериментальное определение деформаций, напряжений и перемещений ... 308

5.1. Общие положения ... 308
5.2. Цели, объекты и условия проведения экспериментальных исследований ... 309
5.3. Упругие модели и условия их нагружения ... 311
5.4. Условия упругого моделирования и пересчет результатов исследования на натурную конструкцию ... 312
5.5. Тензометрирование ... 313
5.6. Поляризационно-оптический метод ... 319

*Приложение 4* (рекомендуемое). **Расчет элементов конструкций на прогрессирующее формоизменение** ... 322

1. Общие положения ... 322
2. Определения. Расчетные напряжения ... 323
3. Предельные напряжения ... 324
4. Дополнительные условные обозначения ... 325
5. Последовательность расчета на прогрессирующее формоизменение при отсутствии радиационного распухания ... 325
6. Пример расчета цилиндрической оболочки ... 334
7. Диаграммы приспособляемости для некоторых типовых расчетных схем ... 341
8. Метод определения значения необратимого формоизменения в условиях нейтронного облучения ... 360

9. Пример расчета верхней и нижней оценок параметров предельного цикла ... 361

*Приложение 5* (рекомендуемое). **Расчет типовых узлов деталей и конструкций** ... 373

1. Основные положения ... 373
2. Трубопроводы ... 374
2.1. Условные обозначения ... 374
2.2. Общие положения ... 375
2.3. Низкотемпературные трубопроводы ... 375
2.4. Высокотемпературные трубопроводы ... 381
2.5. Определение коэффициента податливости криволинейной трубы ... 383
2.6. Определение коэффициентов интенсификации напряжений для криволинейной трубы ... 384
2.7. Определение коэффициента местных напряжений изгиба для тройникового узла ... 385
2.8. Расчет напряжений в криволинейной трубе по уточненной методике ... 386
2.9. Расчет напряжений в тройниковом соединении по уточненной методике ... 389
2.10. Специальные расчеты трубопроводов ... 398
3. Разъемные соединения сосудов ... 399
3.1. Условные обозначения ... 399
3.2. Общие положения ... 401
3.3. Расчет разъемного соединения ... 401
3.4. Расчет коэффициента нагрузки ... 401
3.5. Расчет усилий в шпильках, вызванных температурными перепадами ... 403
3.6. Расчет усилий начальной затяжки шпилек ... 403
3.7. Расчет усилий на прокладке ... 407
3.8. Расчет усилий в шпильках ... 409
3.9. Расчет напряжений в шпильках ... 409

*Приложение 6.* **Характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести конструкционных материалов** ... 411

1. Основные понятия и обозначения ... 411
2. Общие положения ... 412
3. Метод экстраполяции длительной прочности ... 425
4. Метод экстраполяции условных пределов ползучести ... 430
5. Метод экстраполяции условных пределов длительной пластичности ... 440

*Приложение 7* (рекомендуемое). **Расчет на длительную циклическую прочность** ... 443

*Приложение 8* (рекомендуемое). **Расчетно-экспериментальные методы оценки вибропрочности типовых элементов конструкций**..... 462

1. Общие положения..... 462
2. Расчет собственных частот колебаний стержневых систем..... 465
3. Расчет собственных частот колебаний изотропных прямоугольных пластин..... 468
4. Расчет собственных частот колебаний пологих прямоугольных оболочек..... 472
5. Экспериментальные методы исследования вибраций..... 474
   5.1. Цель экспериментальных исследований..... 474
   5.2. Методы исследований..... 474
   5.3. Объекты экспериментальных исследований..... 474
   5.4. Условия проведения эксперимента..... 475
   5.5. Динамическое тензометрирование..... 475
   5.6. Виброметрирование..... 475
   5.7. Обработка результатов..... 476
6. Рекомендуемые методы оценки вибропрочности элементов конструкций..... 476

*Приложение 9* (рекомендуемое). **Расчет на сейсмические воздействия**..... 478

1. Обобщенные спектры ответа..... 478
2. Унифицированные методы расчета оборудования и трубопроводов на прочность от сейсмических воздействий..... 479
   2.1. Условные обозначения, индексы и определения..... 479
   2.2.Выбор метода расчета..... 481
   2.3. Принципы построения механической модели и расчет ее параметров..... 481
   2.4. Расчет типовых конструкций, сборочных единиц и деталей оборудования..... 485
   2.5. Линейно-спектральный метод расчета..... 492
   2.6. Метод динамического анализа сейсмостойкости..... 495
3. Методики расчета трубопроводов на сейсмические воздействия. 496
   3.1. Вводная часть..... 496
   3.2. Методика расчета трубопроводов по спектрам ответа..... 496
   3.3. Методика расчета трубопроводов по обобщенной сейсмической нагрузке..... 502

*Приложение 10* (рекомендуемое). **Выбор основных размеров фланцев, нажимных колец и крепежных деталей**..... 504

1. Условные обозначения..... 504
2. Выбор уплотнения..... 505
3. Определение усилий в шпильках..... 507

4. Определение размеров фланцевых соединений ... 509
4.1. Цилиндрический участок фланца ... 509
4.2. Конический переход ... 510
4.3. Размеры тарелки фланца ... 510
5. Изгибающие моменты ... 511
6. Высота тарелки фланца ... 513

*Приложение 11.* **Рекомендации по определению технологической прибавки к толщине стенки колена** ... 516

*Приложение 12* (рекомендуемое). **Упрощенный расчет на циклическую прочность** ... 517

1. Основные положения ... 517
2. Определение перепадов температур, напряжений и числа эксплуатационных циклов ... 517
3. Проверка циклической прочности ... 523

## Основные условные обозначения

$D_a$ — номинальный наружный диаметр цилиндрической части корпуса, днища или трубопровода, мм

$D$ — номинальный внутренний диаметр цилиндрической части корпуса, крышки, днища или трубопровода, мм

$D_m$ — средний диаметр цилиндрической части корпуса, крышки, днища или трубопровода, мм

$D_R$ — расчетный диаметр круглого плоского днища или крышки, мм

$D_n$ — наружный диаметр накладки, мм

$R_g$ — радиус оси колена, мм

$R$ — внутренний радиус выпуклого днища, мм

$d$ — диаметр отверстия, мм

$d_R$ — расчетный диаметр отверстия, мм

$d_0$ — наибольший допускаемый диаметр неукрепленного отверстия, мм

$d_{ac}$ — наружный диаметр штуцера, мм

$d_{01}$, $d_{02}$ — большая и малая оси овального отверстия, мм

$s$ — номинальная толщина стенки, мм

$s_R$ — расчетная толщина стенки, мм

$s_0$ — минимальная расчетная толщина стенки, мм

$s_f$ — фактическая толщина стенки, мм

$s_c$ — толщина стенки штуцера, мм

$s_n$ — толщина накладки, мм

$c$ — суммарная прибавка к толщине стенки, мм

$c_{11}$ — прибавка к толщине стенки, равная отрицательному допуску, мм

$c_{12}$ — прибавка к толщине стенки, компенсирующая возможное утонение полуфабриката при изготовлении, мм

$c_2$ — прибавка к толщине стенки, учитывающая утонение стенки за счет всех видов коррозии за срок службы изделия, мм

$H$ — высота выпуклой части днища до внутренней поверхности, мм

$H_m$ — высота выпуклой части днища до срединной поверхности, мм

$A_s$ — площадь сечения элемента конструкции, мм

$L$ — расчетная длина оболочки, мм

$L_{kr}$ — критическая длина оболочки, мм

$\varphi$ — расчетный коэффициент снижения прочности

$\varphi_d$ — коэффициент снижения прочности обечаек или днищ с неукрепленным отверстием

$\varphi_c$ — коэффициент снижения прочности обечаек или днищ с укрепленным отверстием

$\varphi_w$ — коэффициент снижения прочности сварного шва

$\varphi_0$ — минимальный допускаемый коэффициент снижения прочности

$p$ — расчетное давление, МПа (кгс/мм$^2$)

$p_a$ — наружное давление, МПа (кгс/мм$^2$)

$p_{kr}$ — критическое давление, МПа (кгс/мм$^2$)

$F$ — сжимающее усилие, Н (кгс)

$[p_a]$ — допускаемое наружное давление, МПа (кгс/мм$^2$)

$[F]$ — допускаемое сжимающее усилие, Н (кгс)

$T$ — расчетная температура, К (°С)

$T_t$ — температура, при превышении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести, К (°С)

$T_k$ — критическая температура хрупкости, К (°С)

$T_{k0}$ — критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии, К (°С)

$T_h$ — температура гидравлических (пневматических) испытаний, К (°С)

$\Delta T_T$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения, К (°С)

$\Delta T_N$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие циклической повреждаемости, К (°С)

$\Delta T_F$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие нейтронного облучения, К (°С)

$\sigma$ — напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_m$ — общие мембранные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{mL}$ — местные мембранные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_b$ — общие изгибные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_T$ — общие температурные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{TL}$ — местные температурные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_к$ — напряжения компенсации, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{кm}$ — напряжения компенсации растяжения или сжатия, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{кb}$ — напряжения компенсации изгиба, МПа (кгс/мм$^2$)

$\tau_{кs}$ — напряжения компенсации кручения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{mw}$ — средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, МПа (кгс/мм$^2$)

$\tau_{sw}$ — напряжения кручения в болтах или шпильках, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_1$, $\sigma_2$, $\sigma_3$ — главные напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{kr}$ — критическое напряжение сжатия, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_c$ — напряжение сжатия, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma)_1$, $(\sigma)_2$, $(\sigma)_{3w}$, $(\sigma)_{4w}$, $(\sigma_s)_1$, $(\sigma_s)_2$, $(\sigma_s)_{3w}$, $(\sigma_s)_{4w}$ — группы приведенных напряжений, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma)_{RV}$ — размах приведенных напряжений в элементах оборудования, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma)_{RK}$ — размах приведенных напряжений в элементах трубопроводов, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_i$, $\sigma_j$, $\sigma_k$ — напряжения на главных площадках $i$, $j$, $k$, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$, $(\sigma)$ — приведенные напряжения без учета концентрации, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_L)_{ij}$, $(\sigma_L)_{jk}$, $(\sigma_L)_{ik}$, $(\sigma_L)$ — местные приведенные напряжения, рассчитанные с учетом теоретического коэффициента концентрации напряжений, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$, $(\sigma_F)$ — местные условные упругие приведенные напряжения, рассчитанные с учетом коэффициента концентрации условных упругих напряжений, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_a$ — амплитуда напряжений без учета концентрации, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{aF}$ — амплитуда местных напряжений с учетом концентрации, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_a)$ — амплитуда приведенных напряжений без учета концентрации, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_{aF})$ — амплитуда условных упругих приведенных напряжений с учетом коэффициента концентрации условных упругих напряжений, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_{aF})_V$ — амплитуда приведенных напряжений в элементах оборудования, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_{aF})_K$ — амплитуда приведенных напряжений в элементах трубопроводов, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_{aF})_W$ — амплитуда приведенных напряжений в болтах или шпильках, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_{aL})$ — амплитуда приведенных напряжений с учетом теоретического коэффициента концентрации, МПа (кгс/мм$^2$)

$(\sigma_F)_{max}$ — максимальное приведенное условное упругое напряжение цикла с учетом коэффициента концентрации условных упругих напряжений, МПа (кгс/мм$^2$)

$<\sigma_a>$ — амплитуда вибронапряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение, МПа (кгс/мм$^2$)

$[\sigma]^{Th}$ — номинальное допускаемое напряжение при температуре гидроиспытаний, МПа (кгс/мм$^2$)

$[\sigma_c]$ — допускаемое напряжение сжатия, МПа (кгс/мм$^2$)

$R_m^T$ — минимальное значение временного сопротивления при расчетной температуре, МПа (кгс/мм$^2$)

$R_{p0,2}^T$ — минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа (кгс/мм$^2$)

$R^{Th}_{p0,2}$ — минимальное значение предела текучести при температуре гидроиспытаний, МПа (кгс/мм$^2$)

$R^{T}_{-1}$ — предел выносливости при симметричном цикле осевого растяжения—сжатия при расчетной температуре, МПа (кгс/мм$^2$)

$t$ — время, ч

$R^{T}_{mt}$ — минимальный предел длительной прочности за время $t$ при расчетной температуре, МПа (кгс/мм$^2$)

$R^{T}_{ct}$ — предел ползучести при расчетной температуре, при котором деформация с учетом ползучести достигает заданного значения за время $t$, МПа (кгс/мм$^2$)

$R^{T}_{pe}$ — предел пропорциональности при расчетной температуре, МПа (кгс/мм$^2$)

$A^{T}_{5}$ — относительное удлинение пятикратного образца при статическом разрушении при растяжении при расчетной температуре, %

$Z^{T}$ — относительное сужение поперечного сечения образца при статическом разрушении при растяжении при расчетной температуре, %

$\alpha^{T}$ — коэффициент линейного расширения при расчетной температуре, 1/К (1/°С)

$E^{T}$ — модуль упругости при расчетной температуре, МПа (кгс/мм$^2$)

$\mu$ — коэффициент Пуассона

$N$ — число циклов нагружения элемента конструкции в эксплуатации

$N_0$ — число циклов до появления трещин в конструкции

$f_0$ — частота нагружения, Гц

$f$ — частота высокочастотных циклов напряжений, Гц

$r$ — коэффициент асимметрии цикла напряжений

$\nu$ — показатель упрочнения кривой деформирования

$K_\sigma$ — теоретический коэффициент концентрации напряжений

$K_{(\sigma)}$ — теоретический коэффициент концентрации приведенных напряжений

$K_{\sigma f}$ — эффективный коэффициент концентрации условных упругих напряжений

$a$ — накопленное усталостное повреждение

$e$ — деформация, %

$F_n$ — перенос нейтронов с энергией более 0,5 МэВ, нейтр./м$^2$

$A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, К (°С)

$K_I$ — коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$ (кгс/мм$^{3/2}$)

$K_{Ic}$ — критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$ (кгс/мм$^{3/2}$)

$n_{0,2}$ — коэффициент запаса прочности по пределу текучести

$n_m$ — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению

$n_{mt}$ — коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности

$n_\sigma$ — коэффициент запаса прочности по условным местным напряжениям при расчетах на циклическую прочность

$n_N$ — коэффициент запаса прочности по числу циклов при расчетах на циклическую прочность

НГА — нормы государственные атомные

АЭУ — атомная энергетическая установка

НУЭ — нормальные условия эксплуатации

ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации

АС — аварийная ситуация

Правила АЭУ — «Правила устройства и безопасности эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок»

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМ

1.1.1. Настоящие «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (в дальнейшем именуемые Нормами) должны применяться для оценки прочности оборудования и трубопроводов атомных электростанций (АЭС), атомных теплоцентралей (АТЭЦ), атомных станций теплоснабжения (АСТ), атомных станций промышленного теплоснабжения (АСПТ) и установок с исследовательскими или опытными реакторами с температурой теплоносителя не выше 873 К (600° С).

1.1.2. Нормы распространяются на оборудование и трубопроводы, проектирование, изготовление, монтаж и эксплуатация которых производятся в полном соответствии с Правилами АЭУ.

1.1.3. За правильность применения настоящих норм несет ответственность предприятие или организация, выполнявшие соответствующий расчет.

## 1.2. ПРИНЦИПЫ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ НОРМ

1.2.1. В основу принятых в Нормах методов расчета положены принципы оценки по следующим предельным состояниям:

1) кратковременное разрушение (вязкое и хрупкое);

2) разрушение в условиях ползучести при статическом нагружении;

3) пластическая деформация по всему сечению детали;

4) накопление предельно допустимой деформации ползучести;

5) циклическое накопление пластической деформации, которое приводит к недопустимому изменению размеров или квазистатическому разрушению;

6) возникновение макротрещин при циклическом нагружении;

7) потеря устойчивости.

При температурах, не вызывающих ползучесть материала конструкции, расчет по указанным предельным состояниям проводят с использованием кратковременных характеристик прочности, пластичности и сопротивления деформированию материала, не зависящих от времени. Исключение составляет учет деформационного старения и облучения при расчете сопротивления хрупкому разрушению и появлению макротрещин при циклическом нагружении. Если эксплуатация оборудования и трубопроводов происходит при температурах, вызывающих ползучесть материала, то расчет проводят по указанным предельным состояниям с использованием характеристик кратковременной и длительной прочности, кратковременной и длительной пластичности и ползучести.

1.2.2. Расчет на прочность оборудования и трубопроводов при проектировании проводят в два этапа:

1) расчет по выбору основных размеров;

2) поверочный расчет.

При оценке прочности оборудования и трубопроводов должны полностью удовлетворяться как требования расчета по выбору основных размеров, так и поверочного расчета.

1.2.3. При выполнении расчета по выбору основных размеров учитывают действующее на оборудование и трубопроводы давление (внутреннее и наружное), а для болтов и шпилек — усилие затяга.

1.2.4. В качестве основных характеристик материалов, используемых при определении значений допускаемых напряжений, приняты временное сопротивление, предел текучести, предел длительной прочности и предел ползучести (при ограничении деформации).

Допускаемые напряжения устанавливают по указанным характеристикам введением соответствующих запасов прочности.

1.2.5. В основу формул, используемых при расчете по выбору основных размеров, положен метод предельных нагрузок, соответствующих следующим предельным состояниям: вязкое разрушение, охват пластической деформацией всего сечения оборудования или трубопровода, потеря устойчивости и достижение предельной деформации.

1.2.6. После расчета по выбору основных размеров проводят поверочный расчет, включающий необходимые разделы из следующего перечня:

1) расчет на статическую прочность;

2) расчет на устойчивость;

3) расчет на циклическую и длительную циклическую прочность;

4) расчет на сопротивление хрупкому разрушению;

5) расчет на длительную статическую прочность;
6) расчет на прогрессирующее формоизменение;
7) расчет на сейсмические воздействия;
8) расчет на вибропрочность.

Поверочный расчет основывается на оценке прочности по допускаемым напряжениям, деформациям и коэффициентам интенсивности напряжения.

1.2.7. При поверочном расчете учитывают все действующие нагрузки (включая температурные воздействия) и рассматривают все режимы эксплуатации.

1.2.8. Поверочный расчет на статическую прочность проводят для определения напряжений при всех значениях нагрузок и температур в регламентированных проектом режимах работы установки и сопоставления полученных значений с допускаемыми, определенными по предельным состояниям, указанным в 1) и 3) п. 1.2.1.

1.2.9. Поверочный расчет на устойчивость заключается в определении допускаемых нагрузок или допускаемого ресурса эксплуатации, превышение которых вызывает возможность потери устойчивости при нагружении наружным давлением и сжимающими нагрузками [см. 7) п. 1.2.1].

1.2.10. Поверочный расчет на прочность при циклическом и длительном циклическом нагружении выполняют на основе анализа общей и местной напряженности с целью исключения появления трещин [см. 6) п. 1.2.1].

Допускаемые амплитуды напряжений определяют исходя из характеристик циклической или длительной циклической прочности с введением запасов прочности по долговечности и напряжениям.

В результате расчета на прочность при циклическом и длительном циклическом нагружении определяют допускаемое число повторений эксплуатационных режимов для заданных повторных эксплуатационных тепловых и механических нагрузок, температур и ресурса или допускаемые тепловые и механические нагрузки для заданного числа повторений эксплуатационных режимов и ресурса эксплуатации.

1.2.11. Поверочный расчет на сопротивление хрупкому разрушению проводят на основе сопоставления коэффициента интенсивности напряжений с критическим значением в целях исключения возможности хрупкого разрушения [см. 1) п. 1.2.1].

1.2.12. Расчет на длительную статическую прочность проводят на основе сопоставления действующих напряжений во всех режимах с допускаемыми с целью исключения разрушения оборудования или трубопроводов при длительном статическом нагружении [см. 2) и 4) п. 1.2.1].

Допускаемые напряжения определяют исходя из характеристик сопротивления длительному статическому разрушению,

зависящих от температуры и длительности нагружения, с введением запасов прочности по напряжениям.

В результате расчета определяют допускаемые нагрузки для заданных режимов и ресурса эксплуатации или допускаемый ресурс для заданных режимов эксплуатации.

1.2.13. Поверочный расчет на прогрессирующее формоизменение проводят на основе анализа напряженного состояния с целью исключения недопустимых остаточных изменений формы и размеров [см. 5) п. 1.2.1].

Предельные допускаемые изменения формы и размеров в результате процесса накопления необратимых пластических деформаций устанавливаются проектной (конструкторской) организацией в каждом частном случае с учетом назначения и условий работы оборудования или трубопроводов.

В результате расчета определяют допускаемые нагрузки для заданных режимов и ресурса эксплуатации или допускаемый ресурс для заданных режимов эксплуатации.

1.2.14. Поверочный расчет оборудования и трубопроводов на сейсмические воздействия проводят с учетом совместного действия эксплуатационных и сейсмических нагрузок.

Оценку прочности оборудования и трубопроводов выполняют по допускаемым напряжениям, по допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности и устойчивости (последнее — только для оборудования).

1.2.15. Приведенные напряжения, сопоставляемые с допускаемыми, определяют по теории наибольших касательных напряжений, за исключением расчета на сопротивление хрупкому разрушению, когда приведенные напряжения определяют по теории наибольших нормальных напряжений.

1.2.16. Расчет напряжений без учета концентрации проводят в предположении линейно-упругого поведения материала, за исключением особо оговоренных случаев. При оценке циклической прочности за пределами упругости используется напряжение, называемое условным упругим. Это напряжение равно произведению упругопластической деформации в рассматриваемой точке на модуль упругости.

1.2.17. При расчетах по выбору основных размеров повышение пределов прочности и текучести под действием облучения не учитывают. Снижение характеристик пластичности, сопротивления хрупкому, усталостному, длительному статическому разрушению и ползучести вследствие влияния облучения учитывают при проведении соответствующих расчетов с использованием этих характеристик.

1.2.18. Влияние рабочих сред на изменение характеристик прочности при необходимости должно учитываться в поверочном расчете на основе представительных экспериментальных данных.

## 2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2.1. Расчетное давление — максимальное избыточное давление в оборудовании или трубопроводе, используемое при расчете по выбору основных размеров, при котором допускается работа данного оборудования или трубопровода при режимах НУЭ.

Для страховочных корпусов оборудования и трубопроводов и защитных оболочек под расчетным давлением понимается максимальное избыточное давление, которое возникает в этих корпусах или оболочках при разгерметизации защищаемого оборудования или трубопроводов.

В случае, если элемент конструкции одновременно нагружен внутренним и наружным давлениями, за расчетное давление принимают разницу этих давлений, при которой расчетная толщина стенки получается максимальной.

2.2. Расчетная температура — температура стенки оборудования или трубопровода, равная максимальному среднеарифметическому значению температур на его наружной и внутренней поверхностях в одном сечении при режиме НУЭ (для частей корпусов ядерных реакторов расчетная температура определяется с учетом внутренних тепловыделений как среднеарифметическое значение распределения температур по толщине стенки корпуса).

2.3. Гидравлическое или пневматическое испытание — пробное нагружение оборудования или трубопроводов внутренним или наружным давлением с целью проверки их сплошности после изготовления, монтажа, определенного периода эксплуатации или ремонта.

Значение давления гидравлического или пневматического испытания определяют в соответствии с Правилами АЭУ.

2.4. Затяг шпилек — нагружение элементов оборудования или трубопроводов, вызванное затягом шпилек или болтов.

2.5. Пуск — эксплуатационный режим, в процессе которого внешние нагрузки и температуры меняются от начальных значений до значений, соответствующих стационарному режиму. При пуске температура и внешние нагрузки могут превышать значения, соответствующие стационарному режиму.

2.6. Стационарный режим — эксплуатационный режим, при котором внешние нагрузки и температура остаются постоянными в пределах $\pm 5\%$ номинальных значений.

2.7. Работа системы аварийной защиты — эксплуатационный режим, при котором вследствие срабатывания системы аварийной защиты по причинам, не связанным с режимами ННУЭ и возникновением режима АС, происходит изменение температур и внешних нагрузок (в сторону как повышения, так и понижения) от их значений при стационарном режиме, пуске

или остановке до соответствующих промежуточных значений (в частном случае до атмосферных давления и температуры).

2.8. Изменение мощности реактора — эксплуатационный режим, при котором происходит переход с одного стационарного режима работы реактора на другой (за исключением режимов пуска и остановки).

2.9. Остановка — эксплуатационный режим, при котором температура и внешние нагрузки изменяются от значений параметров любого из эксплуатационных режимов до начальных значений параметров при режиме пуска.

2.10. Определение режима НУЭ — см. приложение 1 к Правилам АЭУ.

2.11. Определение режима ННУЭ — см. приложение 1 к Правилам АЭУ.

2.12. Определение режима АС — см. приложение 1 к Правилам АЭУ.

2.13. Цикл изменения напряжений — изменение напряжений от исходного значения с переходом через максимальное и минимальное алгебраические значения до исходного.

2.14. *Полуцикл изменения напряжений* — изменение напряжений от максимального (минимального) значения до минимального (максимального) значения в рассматриваемом цикле.

2.15. Размах напряжений — разность максимального и минимального напряжений в процессе одного цикла изменения напряжений.

2.16. Максимальное (минимальное) напряжение цикла — максимальное (минимальное) алгебраическое значение напряжений для одного цикла их изменения.

2.17. Рабочий ресурс — суммарное время стационарных и переходных эксплуатационных режимов, включая режимы ННУЭ и АС.

2.18. $\sigma_m$ — общие мембранные напряжения, вызываемые действием механических нагрузок, нормальные к рассматриваемому сечению, распределенные по всему сечению и равные среднему значению напряжений в данном сечении.

2.19. $\sigma_{mL}$ — местные мембранные напряжения, вызываемые действием механических нагрузок. Мембранные напряжения относят к категории местных, если размеры зоны, в пределах которой напряжения превосходят $1{,}1[\sigma]$, не превышают $0{,}7\sqrt{D(s-c)}$ и эта зона расположена не ближе чем на $1{,}7\sqrt{D(s-c)}$ к другой области, где напряжения превышают $[\sigma]$.

2.20. $\sigma_b$ — общие изгибные напряжения, вызываемые действием давления и механических нагрузок, меняющиеся от максимального положительного значения до минимального отрицательного значения по всему сечению и приводящие к изгибу корпуса сосуда или трубопровода в целом.

2.21. $\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения, вызываемые действием краевых сил и моментов от механических нагрузок.

2.22. $\sigma_T$ — общие температурные напряжения, возникающие от неравномерного распределения температур по объему элемента или из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов, приводящие в предельном случае к недопустимым остаточным изменениям формы и размеров конструкции.

2.23. $\sigma_{TL}$ — местные температурные напряжения, возникающие от неравномерного распределения температур по объему элемента или из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов, которые не могут вызывать недопустимых остаточных изменений формы и размеров конструкций.

2.24. $\sigma_к$ — напряжения компенсации, вызываемые стеснением свободного расширения трубопроводов или труб. В число этих напряжений входят напряжения растяжения или сжатия $\sigma_{kт}$, изгиба $\sigma_{kb}$, кручения $\tau_{ks}$.

2.25. $\sigma_{mw}$ — средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызываемые механическими нагрузками (с учетом или без учета затяга).

2.26. $\tau_{sw}$ — напряжения кручения в болтах и шпильках.

2.27. $(\sigma)_1$ — группа приведенных напряжений, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений.

2.28. $(\sigma)_2$ — группа приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений.

2.29. $(\sigma)_{3w}$ — группа приведенных напряжений, определяемая как сумма средних по сечению болта или шпильки напряжений растяжения, вызываемых механическими нагрузками, включая усилие затяга, и температурными воздействиями.

2.30. $(\sigma)_{4w}$ — группа приведенных напряжений от механических и температурных воздействий, включая усилие затяга, определяемая по составляющим напряжений растяжения, изгиба и кручения в болтах и шпильках.

2.31. $(\sigma_s)_1$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок и сейсмических воздействий, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений.

2.32. $(\sigma_s)_2$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок и сейсмических воздействий, определяемая по составляющим мембранных и общих изгибных напряжений.

2.33. $(\sigma_s)_{mw}$ — группа приведенных напряжений, определяемая по суммам средних по сечению болта или шпильки напряжений растяжения, вызываемых механическими нагрузками и сейсмическими воздействиями.

2.34. $(\sigma_s)_{4w}$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок, температурных и сейсмических воздействий, определяемая по составляющим напряжений растяжения, изгиба и кручения в болтах или шпильках.

2.35. $(\sigma)_{RV}$ — максимальный размах приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих температурных напряжений и напряжений компенсации в оборудовании.

2.36. $(\sigma)_{RK}$ — максимальный размах приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих температурных напряжений и напряжений компенсации в трубопроводах.

2.37. $(\sigma_{aF})_V$ — амплитуда приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных напряжений и напряжений компенсации с учетом концентрации напряжений в оборудовании.

2.38. $(\sigma_{aF})_K$ — амплитуда приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных напряжений и напряжений компенсации с учетом концентрации напряжений в трубопроводах.

2.39. $(\sigma_{aF})_W$ — амплитуда приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих средних напряжений по сечению болта или шпильки, вызванных механическими и температурными воздействиями, напряжений изгиба, кручения и температурных напряжений с учетом концентрации напряжений.

## 3. ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, УСЛОВИЯ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

3.1. Номинальные допускаемые напряжения определяют по характеристикам материала при расчетной температуре.

3.2. Номинальные допускаемые напряжения для элементов с расчетной температурой, равной $T_t$ или ниже ее, рассчитывают по пределу текучести и временному сопротивлению.

Для элементов с расчетной температурой выше температуры $T_t$ номинальные допускаемые напряжения рассчитывают по пределу текучести, временному сопротивлению и пределу длительной прочности.

3.3. Температура $T_t$ равна:

1) для алюминиевых и титановых сплавов 293 К (20° С);

2) для циркониевых сплавов 523 К (250° С);

3) для углеродистых, легированных, кремнемарганцовистых и высокохромистых сталей 623 К (350° С);

4) для коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, жаропрочных хромомолибденованадиевых сталей и железоникелевых сплавов 723 К (450° С).

3.4. Номинальное допускаемое напряжение для элементов оборудования и трубопроводов, нагруженных давлением, принимают минимальным из следующих значений:

$$[\sigma]=\min\{R_m^T/n_m;\ R_{p0,2}^T/n_{0,2};\ R_{mt}^T/n_{mt}\}.$$

Для элементов оборудования и трубопроводов, нагруженных внутренним давлением,

$$n_m=2{,}6;\ n_{0,2}=1{,}5;\ n_{mt}=1{,}5.$$

Для элементов оборудования и трубопроводов, нагруженных наружным давлением, превышающим внутреннее,

$$n_m=2{,}6;\ n_{0,2}=2;\ n_{mt}=2.$$

Окончательную проверку на устойчивость и корректировку (при необходимости) определенных по настоящему разделу толщин стенок, нагруженных наружным давлением, превышающим внутреннее, проводят в соответствии с разд. 5.5.

3.5. Номинальное допускаемое напряжение в болтах или шпильках от давления и усилий затяга определяют как

$$[\sigma]_w=R_{p0,2}^T/n_{0,2},$$

где $n_{0,2}=2$.

Дополнительно в болтах и шпильках, температура которых превышает температуру $T_t$ по разд. 3.2, устанавливают номинальные допускаемые напряжения от давления как

$$[\sigma]_{wt}=R_{mt}^T/n_{mt}^T,$$

где $n_{mt}=3$.

3.6. Для корпусов страховочных и защитных оболочек номинальные допускаемые напряжения

$$[\sigma]_c=\min\{R_m^T/n_m;\ R_{p0,2}^T/n_{0,2}\},$$

где $n_m=1{,}85$; $n_{0,2}=1{,}07$.

3.7. При определении номинальных допускаемых напряжений значения кратковременных или длительных механических характеристик принимают по данным государственных или отраслевых стандартов (ГОСТ или ОСТ) или технических условий (ТУ). При отсутствии в этих документах необходимых данных следует руководствоваться данными, приведенными в табл. П1.1 или П1.4.

3.8. При температурах, превышающих $T_t$, при заданном ограничении деформации ползучести элементы рассчитывают по пределу ползучести $R_{cl}^T$. В случае отсутствия в ГОСТ, ОСТ или ТУ сведений по пределам ползучести допускается их определение по изохронным кривым, приведенным для ряда материалов в приложении 6.

Коэффициент запаса по пределу ползучести $R_{cl}^T$ принимают равным единице.

3.9. При температурах выше $T_t$ в тех случаях, когда эксплуатация конструкции включает два и более режимов нагружения, отличающихся по температуре или нагрузке, основные размеры должны удовлетворять условию прочности по накопленному длительному статическому повреждению

$$\sum \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1,$$

где $t_i$ — продолжительность работы на $i$-м режиме нагружения; $[t]_i$ — допускаемое время нагружения, соответствующее пределу длительной прочности $R^T_{mt} = n_{mt}\sigma_i$ (значения $R^T_{mt}$ могут быть приняты по табл. 4 приложения 1); $\sigma_i$ — напряжение $i$-го режима.

3.10. Для стальных отливок, необходимые данные для которых отсутствуют в государственных или отраслевых стандартах, технических условиях или в табл. 1 приложения 1, значения предела текучести и временного сопротивления принимают равными: 85% значения, приведенного в табл. 1 для одноименной марки катаной или кованой стали, если отливки подвергаются 100%-ному ультразвуковому или радиографическому контролю; 75% указанных выше значений — для остальных отливок.

3.11. При контакте элементов конструкций с натрием реакторной чистоты в расчетах используют расчетные значения механических характеристик, определяемые умножением значений $R^T_m$, $R^T_{p0,2}$, $R^T_{mt}$, $R^T_{ct}$ на коэффициент снижения $\eta_t$, зависящий от типа материала, температуры и длительности эксплуатации.

При выполнении расчета по выбору основных размеров и проведении поверочного расчета для сталей перлитного класса коэффициент снижения определяют по формуле

$$\eta_t = 1 - 0{,}15 h_c / s_R,$$

где $h_c$ — толщина поверхностного слоя стали, обезуглероженного на 30%.

Значение $h_c$ определяют по данным технических условий на изделие. Для сталей марок 12Х2М, 12Х2М1ФБ допускается определять $h_c$ в порядке, указанном ниже.

На верхнем графике рис. 3.1 или 3.2 определяют точку, соответствующую заданным расчетным температуре $T$ и времени эксплуатации $t$, вертикаль от этой точки в пересечении с кривой нижнего графика определяет точку и соответствующее значение $h_c$ на оси ординат этого графика по горизонтали от полученной точки. Другой способ сводится к вычислению $x$ по приведенным на рис. 3.1 или 3.2 формулам и определению по $x$ значения $h_c$, пользуясь только нижним графиком.

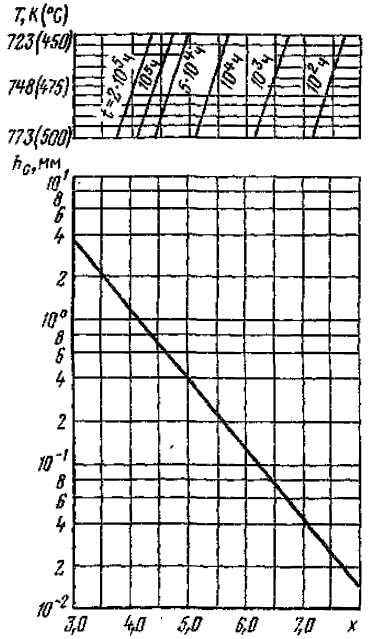



Рис. 3.1. Диаграмма обезуглероживания стали марки 12Х2М в жидком натрии, $x = 7000/T = \lg t$ ($T$ в К)

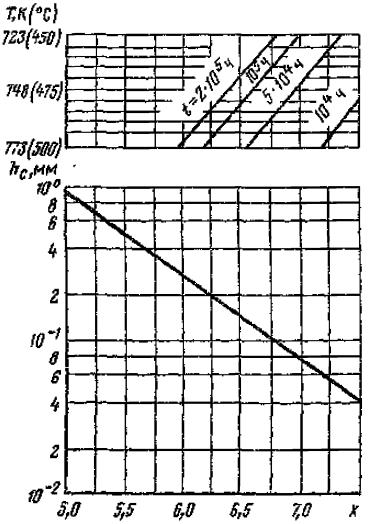



Рис. 3.2. Диаграмма обезуглероживания стали марки 12Х2М1ФБ в жидком натрии, $x = 8650/T = \lg t$ ($T$ в К)

При расчете по выбору основных размеров и поверочном расчете деталей с толщиной стенки более 1 мм и времени эксплуатации не более $2 \cdot 10^5$ ч принимают:

для коррозионно-стойких сталей аустенитного класса с содержанием никеля до 15% при $T \leqslant 823$ К (550° С) $\eta_t = 1$ и при 823 К (550° С) $< T \leqslant 973$ К (700° С) $\eta_t = 0{,}9$;

для железоникелевых сплавов при $T \leqslant 873$ К (600° С) $\eta_t = 0{,}9$ и при 873 К (600° С) $< T \leqslant 973$ К (700° С) $\eta_t = 0{,}8$.

## 4. РАСЧЕТ ПО ВЫБОРУ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ

### 4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1.1. При выполнении расчета по выбору основных размеров расчетными нагрузками являются расчетное давление и

усилия затяга болтов и шпилек. При расчете фланцев, нажимных колец и их крепежных деталей учитывают давление гидроиспытания.

4.1.2. При определении расчетной толщины стенки толщину антикоррозионного наплавленного или плакирующего защитного слоя не учитывают.

4.1.3. Суммарную прибавку к расчетной толщине элемента конструкции определяют как

$$c = c_1 + c_2, \text{ где } c_1 = c_{11} + c_{12}.$$

4.1.4. Прибавка $c_2$ учитывает коррозионное влияние рабочей среды на материал элементов конструкции в эксплуатационных условиях. Значения этой прибавки определяют по табл. 4.1.

В случаях, не указанных в табл. 4.1, значение прибавки $c_2$ устанавливается проектной (конструкторской) организацией с учетом скорости коррозии и времени эксплуатации.

При двустороннем контакте с коррозионной средой прибавку $c_2$ принимают суммарной.

4.1.5. Прибавку $c_{11}$ определяют по конструкторской документации и принимают равной отрицательному допуску на толщину стенки.

4.1.6. Прибавка $c_{12}$ является технологической, предназначенной для компенсации возможного утонения полуфабриката при изготовлении. Значение этой прибавки устанавливается проектной (конструкторской) организацией по согласованию с предприятием-изготовителем и должно указываться в рабочей документации. Прибавку $c_{12}$ при расчете колен допускается определять по приложению 11.

4.1.7 При необходимости выполнения расчета готового изделия следует использовать фактическую толщину стенки $s_f - c_2$.

Толщину стенки $(s_f - c_2)$ для цилиндрических и конических элементов конструкций принимают равной среднему значению четырех измерений толщины стенки по концам двух взаимно перпендикулярных диаметров в одном сечении при числе проверяемых сечений не менее одного на каждые 2 м длины. Для круглых плоских днищ и крышек измерения проводят в центре и в четырех точках по окружности в двух взаимно перпендикулярных направлениях и среднее значение принимают равным $(s_f - c_2)$.

Для эллиптических и полусферических элементов конструкций измерения проводят в центре и в четырех точках по концам наибольших двух взаимно перпендикулярных диаметров и среднее значение принимают равным $s_f$.

Таблица 4.1. **Значение прибавки $c_2$**

| Материал и его сварные соединения | Условия эксплуатации материала в стационарном режиме | Прибавка $c_2$, мм, за время эксплуатации 30 лет |
|---|---|---|
| Коррозионностойкие сплавы аустенитного класса | Вода и пароводяная смесь, насыщенный пар до 623 К (350° С) | 0,1 |
| Стали перлитного класса | Вода, 313—433 К (40—160° С)<br>Вода, 433—543 К (160—270° С)<br>Вода, до 623 К (350° С), pH = 8 ÷ 10<br>Насыщенный пар до 573 К (300° С)<br>Перегретый пар | 0,3<br>1,2<br>1,0<br>1,0<br>0,5 |
| Высокохромистые стали | Вода и насыщенный пар до 558 К (285° С) | 0,1 |
| Циркониевые сплавы | Вода и пароводяная смесь до 558 К (285° С), реакторная среда (смесь гелия с азотом, до 1% влаги по массе) | 0,1 |

Если элемент имеет местное утонение, возникающее при изготовлении (штамповка днищ, гибка труб и др.) или вследствие коррозии, то значение фактической толщины стенки устанавливают в зависимости от расположения и размеров утоненного участка.

4.1.8. Для элементов, не указанных в разд. 4, или если нарушается предел применимости приведенных формул, выбор основных размеров проводят по методикам, которые должны быть в каждом конкретном случае согласованы с организацией, определяемой Госатомэнергонадзором СССР.

## 4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИН СТЕНОК ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ

4.2.1. Цилиндрические, конические обечайки сосудов и выпуклые днища, работающие под внутренним или наружным давлением.

4.2.1.1. Расчетную толщину стенки определяют по формуле

$$s_R = \frac{pDm_3}{m_1\varphi[\sigma] - p}\,\frac{1}{m_2}.$$

Значения коэффициентов $m_1$, $m_2$, $m_3$ и пределы применимости формул приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. **Значения коэффициентов $m_1$, $m_2$, $m_3$ и пределы применимости формул**

| Величина | Цилиндрическая обечайка (рис. 4.1) | Коническая обечайка (рис. 4.2) | Эллиптическое или торосферическое днище (рис. 4.3) | Полусферическое днище (рис. 4.4) |
|---|---|---|---|---|
| $m_1$ | 2 | 2 | 4 | 4 |
| $m_2$ | 1 | $\cos\alpha$ | 1 | 1 |
| $m_3$ | 1 | 1 | $D/(2H)$ | 1 |
| Пределы применимости | $\frac{s-c}{D}\leqslant 0{,}3$ | $0{,}005\leqslant\frac{s-c}{D}\leqslant 0{,}1;\ \alpha\leqslant 45°;$ $\frac{D_0}{D}\leqslant 1-2\sqrt{\left(1+\frac{s-c}{D}\right)\frac{s-c}{D}}\times\frac{\sin\alpha}{\sqrt{\cos\alpha}}$ | $0{,}0025\leqslant\frac{s-c}{D}\leqslant 0{,}1;$ $0{,}2\leqslant\frac{H}{D}\leqslant 0{,}5$ | $0{,}0025\leqslant\frac{s-c}{D}\leqslant 0{,}1$ |

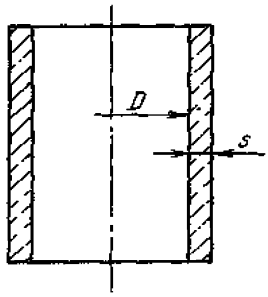



Рис. 4.1. Цилиндрическая обечайка

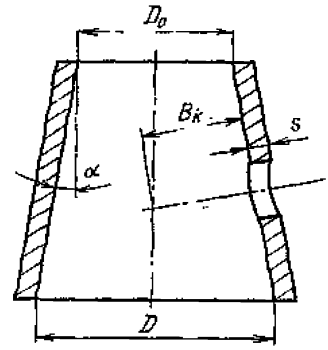



Рис. 4.2. Коническая обечайка

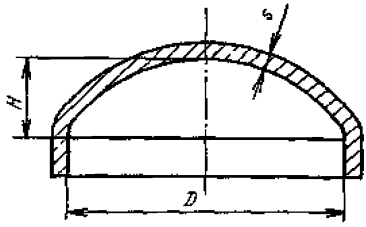



Рис. 4.3. Эллиптическое или торосферическое днище

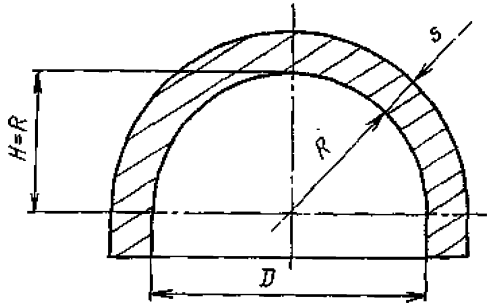



Рис. 4.4. Полусферическое днище

4.2.1.2. Принимаемая номинальная толщина стенки должна удовлетворять условию

$$s \geqslant s_R + c.$$

4.2.1.3. Допускаемое давление при проектировании и после изготовления сосудов определяют по формулам:

при проектировании

$$[p] = \frac{(s-c)m_1 m_2 \varphi [\sigma]}{Dm_3 + (s-c)m_2};$$

после изготовления

$$[p] = \frac{(s_f - c_2)m_1 m_2 \varphi [\sigma]}{Dm_3 + (s_f - c_2)m_2}.$$

4.2.2. Цилиндрические коллекторы, штуцера, трубы и колена.

4.2.2.1. Расчетную толщину стенки цилиндрического коллектора, штуцера и трубы определяют по формуле

$$s_R = \frac{pD_a}{2\varphi [\sigma] + p}.$$

Эта формула применима при $(s-c)/D_a \leqslant 0{,}25$.

4.2.2.2. Принимаемая номинальная толщина стенки цилиндрического коллектора, штуцера и трубы должна удовлетворять условию п. 4.2.1.2.

4.2.2.3. Для колен, работающих под внутренним давлением, с отношением $R_s/D_a \geqslant 1$ (рис. 4.5) расчетную толщину стенки определяют по формулам:

для внешней стороны колена

$$s_{R1} = \frac{pD_a Y_1 K_1}{2\varphi [\sigma] + p};$$

для внутренней стороны колена

$$s_{R2} = \frac{pD_a Y_2 K_2}{2\varphi [\sigma] + p};$$

для средней части колена (в сечении $A - A \pm 15°$ от нейтральной линии колена)

$$s_{R3} = \frac{pD_a Y_3 K_3}{2\varphi [\sigma] + p},$$

где $K_1$, $K_2$, $K_3$ — торовые коэффициенты; $Y_1$, $Y_2$, $Y_3$ — коэффициенты формы.

4.2.2.4. Номинальная толщина стенки колена

$$s \geqslant \max \{s_{R1},\ s_{R2},\ s_{R3}\} + c.$$

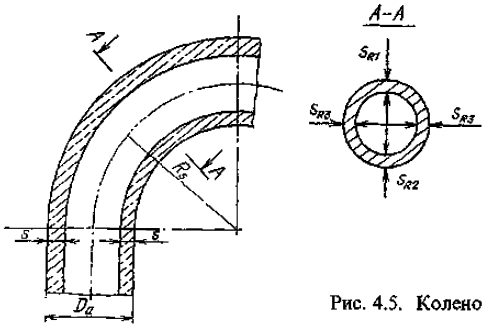



Рис. 4.5. Колено

4.2.2.5. Торовые коэффициенты вычисляют по формулам

$$K_1=(4R_s+D_a)/(4R_s+2D_a);\quad K_2=(4R_s-D_a)/(4R_s-2D_a);\quad K_3=1.$$

4.2.2.6. Для колен, расчетная температура стенки которых не превышает 623 К (350° С) — для углеродистых и кремнемарганцовистых сталей, 673 К (400° С) — для хромомолибденованадиевых сталей, 723 К (450° С) для коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, коэффициенты формы определяют по формулам

$$Y_1=0{,}12\left(1+\sqrt{1+0{,}4\frac{a}{b}q}\right);$$

$$Y_2=Y_1;$$

$$Y_3=0{,}12\left(1+\sqrt{1+0{,}4\frac{a}{b}}\right).$$

Для колен из тех же сталей, но при температуре стенки не менее 673 К (400° С), 723 К (450° С) и 798 К (525° С) соответственно коэффициент формы определяют по формулам

$$Y_1=0{,}4\left(1+\sqrt{1+0{,}015aq/b}\right);$$

$$Y_2=Y_1;$$

$$Y_3=0{,}4\left(1+\sqrt{1+0{,}015a/b}\right),$$

где $a$ — овальность поперечного сечения колена, определяемая согласно Правилам, %; $b=\dfrac{p}{2[\sigma]+p}$; $q=2b\dfrac{R_s}{D_a}+\dfrac{1}{2}$.

Для колен, расчетная температура которых находится между указанными выше значениями, коэффициенты $Y_1$, $Y_2$, $Y_3$ определяют линейным интерполированием в зависимости от значения температуры. При этом в качестве опорных прини-

мают значения коэффициентов, соответствующие указанным граничным температурам.

Если же полученные значения коэффициентов $Y_1$, $Y_2$, $Y_3$ меньше единицы, их следует принимать равными единице.

При $b<0{,}03$ значения коэффициентов $Y_1$, $Y_2$, $Y_3$ принимают равными значению, полученному при $b=0{,}03$. Если вычисленное значение $q>1$, то принимают $q=1$.

4.2.2.7. Значение $s_R+c$ допускается округлять в меньшую сторону на значение, не превышающее 3% номинальной толщины стенки.

4.2.2.8. На концах труб, растачиваемых под стыковую сварку, допускается утонение стенки на 10% расчетной толщины при условии, что суммарная длина расточенного участка не будет превышать меньшее из значений $5s_R$ или $0{,}5D_a$.

4.2.2.9. Допускаемое давление для цилиндрического коллектора, штуцера, трубы и колена определяют по формулам:

при проектировании

$$[p]=\frac{2(s-c)\varphi[\sigma]}{KD_a-(s-c)};$$

после изготовления

$$[p]=\frac{2(s_f-c_2)\varphi[\sigma]}{KD_a-(s_f-c_2)}.$$

Коэффициент $K$ принимают: для цилиндрического коллектора, штуцера и трубы $K=1$; для колена $K=\max\{K_1Y_1;\ K_2Y_2;\ K_3Y_3\}$.

4.2.3. Круглые плоские днища и крышки.

4.2.3.1. Расчетную толщину круглых плоских днищ и крышек (табл. 4.3), работающих под внутренним и наружным давлениями, определяют по формуле

$$s_{1R}=K_4D_R\sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}}.$$

Эта формула применима при условии

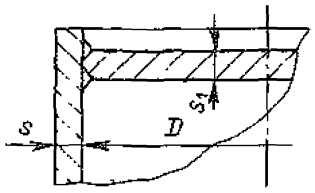
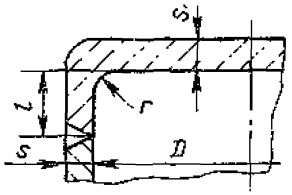
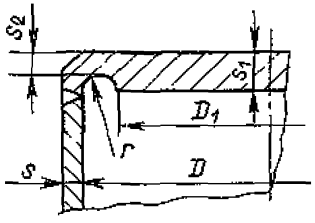
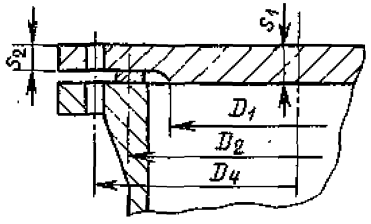
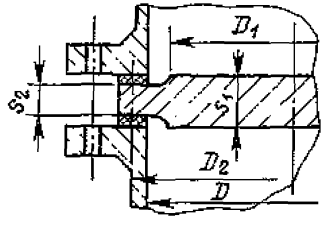
$$(s_1-c)/D_R\leqslant 0{,}2.$$

4.2.3.2. Номинальная толщина круглых плоских днищ и крышек, работающих под внутренним и наружным давлениями, должна удовлетворять условию

$$s_1\geqslant s_{1R}+c.$$

4.2.3.3. Во всех случаях присоединения плоского круглого днища к обечайке толщина днища должна быть равна или больше толщины обечайки, рассчитанной по формуле п. 4.2.1.2.

Таблица 4.3. **Значения расчетного диаметра $D_R$ и коэффициента $K_0$ в зависимости от схемы соединения**

| Тип | Схема соединения | Расчетный диаметр | $K_0$ |
|---|---|---|---|
| 1 |  | $D_R=D$ | 0,53 |
| 2 |  | $D_R=D-r$ | $\frac{0,44}{l\geqslant\sqrt{(D+s)s}}$<br>$\frac{0,47}{l<\sqrt{(D+s)s}}$ |
| 3 |  | $D_R=D$ | 0,47 |
| 4 |  | $D_R=D_4$ | 0,6 |
| 5 |  | $D_R=D_2$ | 0,45 |

4.2.3.4. Значения коэффициента $K_4$ в формуле п. 4.2.3.1 определяют в зависимости от конструкции днищ и крышек по формуле

$$K_4 = K_0 x,$$

где коэффициент $K_0$ принимается в соответствии с табл. 4.3.

Коэффициент $x$, учитывающий жесткость соединения плоского днища с цилиндрической обечайкой, определяют по формуле

$$x = 0{,}5 + \sqrt{0{,}25 - \frac{s_1}{s}\frac{0{,}5\sqrt{p[\sigma]_1}}{(2[\sigma]_2 - p)}}$$

(если при расчете значение $x < 0.76$, то принимается $x = 0{,}76$), где $[\sigma]_1$, $[\sigma]_2$ — номинальные допускаемые напряжения для материалов днища и цилиндрической обечайки соответственно.

Для крышек принимают $x = 1{,}0$.

Указанный в табл. 4.3 радиус закругления $r$ принимают в соответствии с конструкторской документацией.

4.2.3.5. Толщина $s_2$ для типов соединений 3 и 5 (табл. 4.3) должна удовлетворять условию

$$s_2 \geqslant 0{,}35D\sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} + c.$$

Для типа соединения 4 (табл. 4.3)

$$s_2 \geqslant 0{,}75s_1.$$

4.2.3.6. Допускаемое давление при проектировании и после изготовления круглых днищ и крышек, работающих под внутренним и наружным давлениями, определяют по формулам:

при проектировании

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_4 D_R}\right)^2 \varphi[\sigma];$$

после изготовления

$$[p] = \left(\frac{s_{1f} - c_2}{K_4 D_R}\right)^2 \varphi[\sigma].$$

## 4.3. КОЭФФИЦИЕНТЫ СНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И УКРЕПЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ

4.3.1. Снижение прочности одиночным отверстием.

4.3.1.1. Одиночным отверстием считают отверстие, кромка которого удалена от кромки ближайшего отверстия по срединной поверхности на расстояние более $2\sqrt{D_m(s-c)}$.

Если номинальным является наружный диаметр, то средний диаметр

$$D_m = 2B_k + s,$$

где $B_k$ — расстояние от точки пересечения продольных осей отверстия или штуцера с осью оболочки до условной точки пересечения продольной оси отверстия с внутренней образующей детали (см., например, рис. 4.2). Если номинальным является внутренний диаметр, то

$$D_m = D + s.$$

4.3.1.2. Неукрепленным отверстием считают отверстие, не имеющее укрепления в виде штуцера с толщиной стенки, превышающей необходимую по расчету на расчетное давление; приварной накладки; местного утолщения оболочки вокруг отверстия или отбортованного воротника (высаженной горловины), а также отверстие, в котором развальцовываются трубы.

4.3.1.3. Коэффициент снижения прочности цилиндрической, конической и сферической оболочек или выпуклого днища, ослабленных неукрепленным одиночным отверстием, определяют по формуле

$$\varphi_d = 2 \Big/ \left[ \frac{d}{\sqrt{D_m(s-c)}} + 1{,}75 \right].$$

Если вычисленное значение $\varphi_d > 1$, то принимают $\varphi_d = 1$.

Для плоских днищ и крышек

$$\varphi_d = \frac{1}{1 + d/D_R + (d/D_R)^2}.$$

Диаметр отверстий $d$ в расчетах принимают:

1) для круглых отверстий под развальцовку труб, под приварку штуцеров к поверхности оболочки и для отверстий, закрываемых крышкой,— равным диаметру отверстий в обечайках;

2) для некруглых отверстий с отношением размеров по осям симметрии не более 2:1 — равным наибольшему размеру в свету в продольном направлении для отверстий в цилиндрических и конических оболочках и равным наибольшему размеру в свету в каждом направлении для сферических оболочек и выпуклых днищ;

3) для круглых отверстий с пропущенным штуцером, соединенным с оболочкой сварным швом с полным проплавлением стенки оболочки,— равным внутреннему диаметру штуцера;

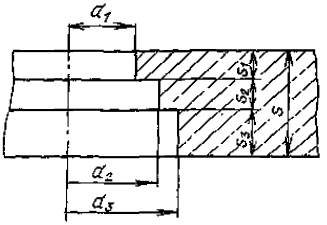



Рис. 4.6. Схема определения условного диаметра отверстия для ступенчатого отверстия

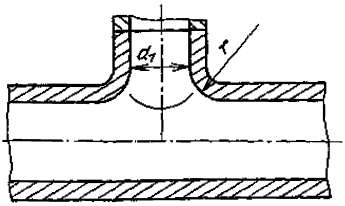



Рис. 4.7. Схема определения условного диаметра отверстия в тройнике с отбортованным воротником

4) для отверстий с разными диаметрами по толщине стенки — равным условному диаметру, определенному по формуле

$$d=(d_1s_1+d_2s_2+d_3s_3)/s,$$

где $d_1$, $d_2$, $d_3$, $s_1$, $s_2$, $s_3$, $s$ показаны на рис. 4.6;

*5) для тройников с отбортованным воротником (высаженной горловиной)* — равным условному диаметру, определяемому по формуле

$$d=d_1+0{,}5r,$$

где $d_1$, $r$ — размеры, показанные на рис. 4.7.

Значение диаметра $D_R$ принимают в зависимости от конструкции днищ и крышек в соответствии с табл. 4.3.

4.3.1.4. Наибольший допускаемый диаметр неукрепленного одиночного отверстия в оболочках определяют по формуле

$$d_0=\left(\frac{2}{\varphi_0}-1{,}75\right)\sqrt{D_m(s-c)},$$

где

$$\varphi_0=\frac{1}{m_1m_2}\,\frac{p\left[Dm_3+(s-c)m_2\right]}{(s-c)[\sigma]}.$$

Значения коэффициентов $m_1$, $m_2$, $m_3$ для оболочек и днищ приведены в табл. 4.2.

4.3.1.5. Если диаметр отверстия $d$ превышает допустимый диаметр $d_0$, определенный по формуле п. 4.3.1.4, то такое отверстие необходимо укрепить с помощью утолщенных штуцеров, приварных накладок, местного утолщения оболочки вокруг отверстия или комбинируя указанные способы. При этом площадь сечений укрепляющих элементов принимают равной сумме площадей поперечных сечений штуцеров и накладок, используемых для укреплений, а также наплавленного металла

приварки, т. е.

$$\sum A = A_c + A_n + A_w,$$

где $A_c$, $A_n$, $A_w$ — площади сечений укрепляющего штуцера, приварной накладки и сварных соединений соответственно.

4.3.1.6. Площадь сечений укрепляющих элементов должна удовлетворять условию

$$\sum A \geqslant (d - d_0) s_0.$$

Если же для укрепления отверстия использование указанных выше способов недостаточно или использование их нерационально по конструктивным соображениям, толщину стенки оболочки следует увеличить, что приведет к соответствующим изменениям $\varphi_0$ и $d_0$ и уменьшению необходимой для укрепления площади $\sum A$.

Утолщение оболочки вокруг отверстия (вварка седловины в цилиндрическую оболочку) следует рассматривать при определении площади укрепления как накладку.

4.3.1.7. Коэффициент снижения прочности стенки цилиндрической, конической и сферической оболочек или выпуклого днища, ослабленных одиночным укрепленным отверстием, определяют по формуле

$$\varphi_c = \varphi_d \left[ 1 + \frac{\sum A}{2(s-c)\sqrt{D_m(s-c)}} \right],$$

где $\varphi_d$ — коэффициент, определяемый по формуле п. 4.3.1.3.

4.3.1.8. При необходимости укрепления одиночного отверстия до заданного значения коэффициента снижения прочности $\varphi$ площадь укрепляющих элементов сечения может быть определена без вычисления допускаемого диаметра отверстия согласно условию

$$\sum A \geqslant \frac{\varphi - \varphi_d}{1 - 0.875\varphi_d} (s - c) d,$$

где $\varphi_d$ — коэффициент, определенный по формуле п. 4.3.1.3.

4.3.1.9. Если укрепляющий элемент изготавливается из материала с меньшим значением $[\sigma]$, чем у материала оболочки, то определенную расчетом площадь этого укрепляющего элемента следует умножить на отношение номинальных допускаемых напряжений для материалов оболочки и укрепляющего элемента.

Более высокое значение $[\sigma]$ у материала укрепляющего элемента по сравнению с $[\sigma]$ для материала оболочки в расчете не учитывают.

4.3.1.10. Площадь сечения укрепляющего штуцера (рис. 4.8) определяют:

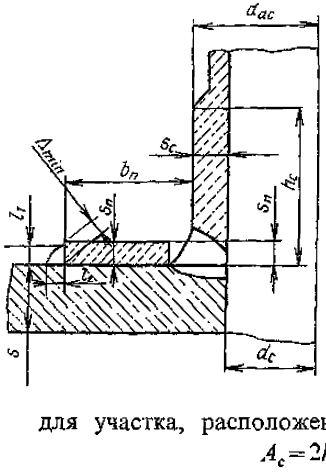



Рис. 4.8. Схема укрепляющих сечений




Рис. 4.9. Схема швов приварной накладки

для участка, расположенного снаружи оболочки (днища),

$$A_c = 2h_c(s_c - s_{0c} - c_c);$$

для участка, расположенного внутри оболочки (днища),

$$A_c = 2h_c(s_c - c_c).$$

В последнем случае прибавку на коррозию учитывают по наружной и внутренней поверхностям штуцера.

Схемы укрепляющих сечений и швов приварной накладки приведены на рис. 4.8 и 4.9.

4.3.1.11. Высоту укрепляющего участка штуцера принимают по рис. 4.8, но не более

$$h_c = \sqrt{(d_{ac} - s_c + c_c)(s_c - c_c)}.$$

4.3.1.12. Номинальные толщины стенок обечайки и штуцера $s$ и $s_c$ определяют соответственно по пп. 4.2.1 и 4.2.2. Минимальные расчетные толщины стенок обечайки и штуцера $s_0$ и $s_{0c}$ определяют по тем же формулам при $\varphi_d = 1$ и $c = 0$.

Номинальная толщина стенки штуцера должна быть не более номинальной толщины стенки обечайки.

4.3.1.13. Площадь сечения укрепляющей приварной накладки определяют по формуле

$$A_n = 2b_n s_n.$$

Ширину накладки $b_n$ принимают по рис. 4.9, но не более

$$b_n = \sqrt{D_m s_n}.$$

Толщину накладки $s_n$ рекомендуется принимать не более $s$. Если $s_n > s$, то рекомендуется установить накладку снаружи $s_{n1}$ и внутри $s_{n2}$ сосуда. Причем $s_{n1} + s_{n2} > 2s$ не допускается.

4.3.1.14. Размеры сварных швов накладки должны удовлетворять условию

$$\Delta_{1\min}+\frac{D_a-2b_n}{D_a}\Delta_{2\min}\geqslant\frac{2{,}1b_n s_n}{D_a}.$$

Размеры сварных швов штуцеров должны удовлетворять условиям

$$\Delta_{\min}\geqslant 2{,}1\frac{h_c s_c}{d_{0c}};\quad \Delta_{\min}\geqslant s_c.$$

Площадь укрепляющего сечения одного сварного шва определяют по формуле

$$A_w=l_1 l_2.$$

4.3.1.15. Приведенные в п. 4.3.1 методы расчета применимы для определения размеров укрепляющих элементов цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ с круглыми и овальными отверстиями.

Пределы применимости расчетных формул ограничиваются соотношениями размеров, приведенными в табл. 4.4.

В табл. 4.4 $D_к$ — внутренний диаметр конической оболочки в *поперечном сечении, проходящем через отверстие.*

Расчетный диаметр отверстия $d_R$ определяют по формулам:

для круглого отверстия или штуцера в поперечном сечении обечайки

$$d_R=d;$$

для конических обечаек в продольном сечении обечайки

$$d_R=d/\cos^2\alpha;$$

для наклонных штуцеров цилиндрических обечаек и для всех штуцеров в полусферических днищах

$$d_R=d/\cos^2\gamma,$$

Таблица 4.4. **Пределы применимости расчетных формул**

| Наименование параметров | В цилиндрических обечайках | В конических обечайках (переходах и днищах) | В эллиптических и полусферических днищах |
|---|---|---|---|
| Отношение диаметров | $\frac{d_R}{D}\leqslant 1{,}0$ | $\frac{d_R}{D_к}\leqslant 1{,}0$ | $\frac{d_R}{D}\leqslant 0{,}5$ |
| Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру | $\frac{s}{D}\leqslant 0{,}1$ | $\frac{s}{D_к}\leqslant\frac{0{,}1}{\cos\alpha}$ | $\frac{s}{D}\leqslant 0{,}1$ |

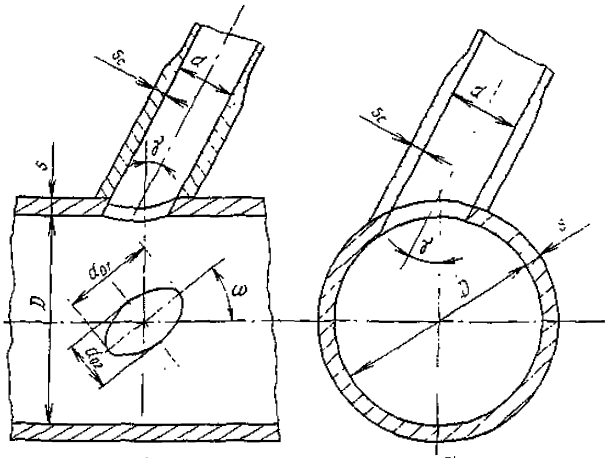



Рис. 4.10. Наклонные штуцера:
*а* — в продольном сечении обечайки; *б* — в поперечном сечении обечайки

где $\gamma$ — угол между осью штуцера и нормалью к поверхности обечайки или днища;

для отверстия наклонного штуцера, когда большая ось овального отверстия составляет угол $\omega$ с образующей поверхностью обечайки (рис. 4.10),

$$d_R = d\left(1 + \mathrm{tg}^2\gamma\cos^2\omega\right);$$

для отверстия смещенного штуцера на эллиптическом днище (рис. 4.11)

$$d_R = \frac{d}{\sqrt{1-(2x_1/D_R)^2}},$$

где расчетный внутренний диаметр эллиптического днища определяют по формуле

$$D_R = \frac{D^2}{2H}\sqrt{1-4\frac{(D^2-4H^2)}{D^4}x_1^2}.$$

4.3.1.16. Приведенная методика определения площади укрепляющих сечений применима при условиях:

1) угол $\gamma$ между осью штуцера и нормалью к поверхности оболочки не превышает 15° (рис. 4.10);

2) для смещенных штуцеров на эллиптических и полусферических днищах угол $\gamma$ не должен превышать 45° (рис. 4.11);

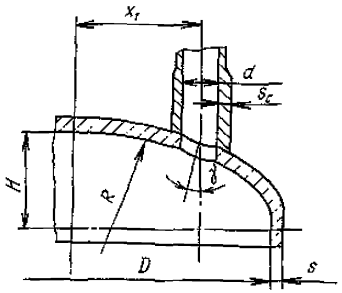



Рис. 4.11. Смещенный штуцер на эллиптическом днище

←

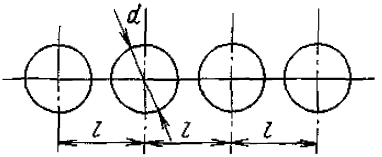



Рис. 4.12. Продольный ряд отверстий с одинаковым шагом

3) расстояние от края днища до оси штуцера, измеряемое по проекции, должно быть не менее $0{,}1D+d/2$.

4.3.2. Снижение прочности при ослаблении рядом отверстий.

4.3.2.1. Используемые в формулах настоящего раздела диаметры и шаги отверстий определяют по срединным поверхностям оболочек.

4.3.2.2. Под рядом отверстий понимают отверстия, расстояние между кромками которых не превышает значения $2\sqrt{D_m(s-c)}$.

4.3.2.3. Коэффициент снижения прочности при продольном ряде отверстий с одинаковым шагом (рис. 4.12) в цилиндрических и конических оболочках или ряде любого направления в эллиптических и сферических оболочках определяют по формуле

$$\varphi_d=(l-d)/l.$$

4.3.2.4. Коэффициент снижения прочности при окружном (поперечном) ряде отверстий с одинаковым шагом (рис. 4.13) в цилиндрической и конической оболочках определяют по формуле

$$\varphi_d=2(l_1-d)/l_1.$$

4.3.2.5. При шахматном расположении отверстий (рис. 4.14) в цилиндрической и конической оболочках определяют три значения коэффициента снижения прочности по формулам:

в продольном направлении

$$\varphi_d=(2a-d)/(2a);$$

в окружном (поперечном) направлении

$$\varphi_d=(2b-d)/b;$$

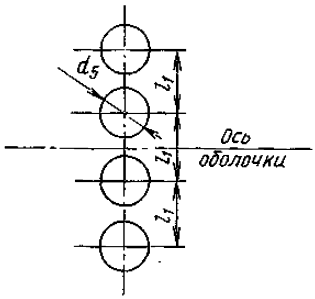



Рис. 4.13. Поперечный ряд отверстий с одинаковым шагом

в косом направлении

$$\varphi_d = \frac{1 - \frac{d}{a}\frac{1}{\sqrt{1+(b/a)^2}}}{\sqrt{1-0{,}75\left[\frac{(b/a)^2}{1+(b/a)^2}\right]^2}}.$$

В качестве расчетного коэффициента снижения прочности принимают меньшее из полученных значений по формулам данного пункта.

4.3.2.6. Для коридорного расположения отверстий (рис. 4.15) значение коэффициента снижения прочности принимают наименьшим из полученных значений для продольного и поперечного рядов отверстий.

4.3.2.7. При неодинаковых шагах между отверстиями (рис. 4.16) или (и) неодинаковых диаметрах отверстий коэффициент снижения прочности $\varphi_d$ принимают равным наименьшему значению коэффициентов снижения прочности для каждой пары соседних отверстий. Диаметр отверстия принимают равным среднеарифметическому значению диаметров соседних отверстий в ряду.

4.3.2.8. Для плоских днищ и крышек, имеющих несколько отверстий, следует определять минимальное значение коэффициента снижения прочности по формуле

$$\varphi_d = \frac{1}{1 + \frac{\sum d_i}{D_R} + \left(\frac{\sum d_i}{D_R}\right)^2}.$$

Максимальную сумму длин хорд отверстий $\sum d_i$ в наиболее ослабленном диаметральном сечении плоского днища или крышки определяют в соответствии с рис. 4.17 по формуле

$$\sum d_i = \max\{(d_1 + d_3); (b_2 + b_3)\}.$$

4.3.2.9. Если несколько одиночных отверстий располагаются в одном направлении с рядом отверстий, принимают наименьшее значение коэффициента снижения прочности из значений для одиночного и ряда отверстий.

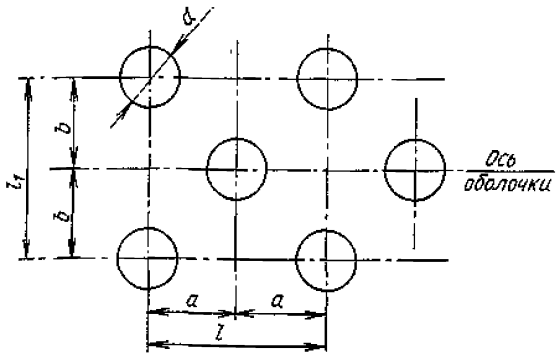



Рис. 4.14. Шахматное расположение отверстий

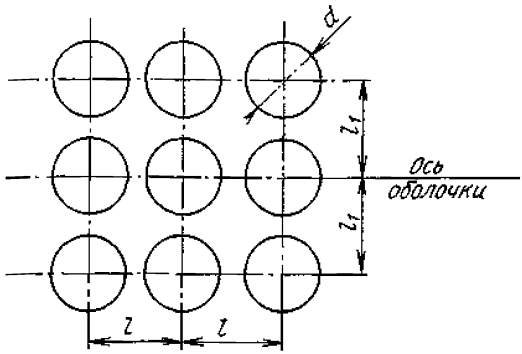



Рис. 4.15. Коридорное расположение отверстий

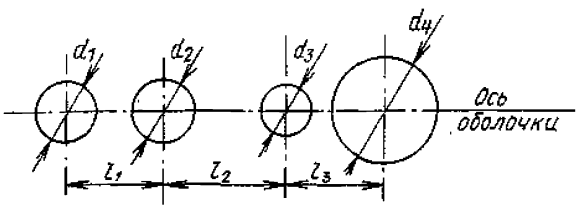



Рис. 4.16. Ряд отверстий с неодинаковыми отверстиями и шагами

4.3.2.10. Если ось ряда отверстий не пересекает центр одиночного отверстия и угол между осью ряда и прямой, соединяющей центр этого отверстия с центром соседнего, не превышает 15°, то при определении коэффициента снижения прочности это отверстие относят к ряду.

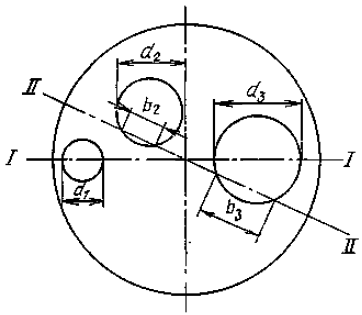



Рис. 4.17. Днище или крышка с неодинаковыми отверстиями и шагами

4.3.2.11. Если ось ряда проходит через некруглое отверстие, за диаметр этого отверстия принимают наибольший размер, определяемый осью ряда или прямой, проходящей через центр некруглого отверстия с отклонением от ряда на угол до 15°.

4.3.2.12. Если каждое из отверстий, образующих ряд, имеет различные укрепляющие элементы, коэффициент снижения прочности такого ряда определяют как минимальное значение для каждой пары соседних отверстий по формуле

$$\varphi_c = \varphi_d + (1-\varphi_d)\frac{A}{d(s-c)},$$

где $\varphi_d$ определяется по формулам пп. 4.3.2.3—4.3.2.5.

4.3.2.13. При необходимости укрепления отверстий в ряду до заданного значения коэффициента снижения прочности $\varphi$ площадь сечений укрепляющих элементов определяют согласно условию

$$\sum A \geqslant \frac{\varphi-\varphi_d}{1-\varphi_d} d(s-c),$$

где $\varphi_d$ определяется по формулам пп. 4.3.2.3—4.3.2.5.

4.3.2.14. Площадь сечений укрепляющих штуцеров для оболочки, ослабленной рядом отверстий с различными по размеру штуцерами, принимают:

для участка, расположенного снаружи оболочки (днища),

$$A_c = h_{c1}(s_{c1}-s_{0c1}-c_{c1}) + h_{c2}(s_{c2}-s_{0c2}-c_{c2});$$

для участка, расположенного внутри оболочки (днища),

$$A_s = h_{c1}(s_{c1}-c_{c1}) + h_{c2}(s_{c2}-c_{c2}),$$

где индексы 1 и 2 относятся к двум соседним отверстиям.

4.3.2.15. Если ряд состоит только из двух отверстий, коэффициент прочности определяют по формуле

$$\varphi_d=\frac{2(1-\varphi_{d\min})+y\varphi_{d\min}}{2(1+y)-(2+y)\varphi_{d\min}},$$

где $\varphi_{d\min}$ — коэффициент снижения прочности для ряда отверстий, определяемый по формулам пп. 4.3.2.2—4.3.2.5, 4.3.2.7.

Величину $y$ определяют по формуле

$$y=d/\sqrt{D_m(s-c)}.$$

4.3.2.16. При произвольной форме укрепляющих элементов или штуцеров выбранные размеры должны удовлетворять условию

$$p\left(\frac{A_{pi}}{A_{\sigma i}}+0{,}5\right)\leqslant[\sigma],$$

где $A_{pi}$ — проекция площади, на которую действует давление $p$, ограниченное по оси и окружности оболочки величиной $b=\sqrt{D_m(s-c)}$ и по оси штуцера — величиной $h_c$, принимаемой по п. 4.3.1.11 (рис. 4.18); $A_{\sigma i}$ — площадь сечения металла наиболее нагруженной части, ограниченная величинами $b$ и $h_c$ (рис. 4.18).

4.3.3. Коэффициент снижения прочности сварных соединений.

4.3.3.1. Коэффициент снижения прочности стыковых, угловых и тавровых сварных соединений $\varphi_w$ выбирают в зависимости от объема дефектоскопического контроля по табл. 4.5.

Для изделий из хромомолибденованадиевых и высокохромистых сталей до температуры 783 К (510° С) принимают $\varphi_w$ по

Рис. 4.18. Схема расчетных площадей укрепляющих элементов →

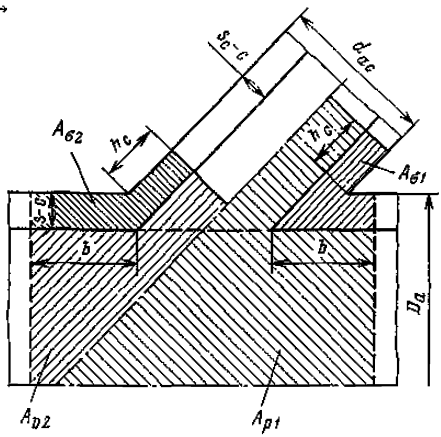



Таблица 4.5. **Значения коэффициентов снижения прочности сварных соединений**

| Объем радиографического или ультразвукового контроля, % | Максимальное значение коэффициента снижения прочности $\varphi_w$ |
|---|---|
| 100 | 1,0 |
| 50 | 0,9 |
| 25 | 0,85 |
| 10 не менее | 0,8 |

табл. 4.5, а при температуре 803 К (530° С) и более $\varphi_w = 0{,}7$ независимо от объема контроля. При расчетных температурах от 783 К (510° С) до 803 К (530° С) значение $\varphi_w$ определяется линейным интерполированием.

Если сварное соединение труб из хромомолибденованадиевых сталей катаных, ковано-сверленных или центробежно-литых с механически обработанной внутренней поверхностью нагружено изгибающими нагрузками и работает при температурах до 783 К (510° С), то независимо от объема контроля следует принимать для катаных труб $\varphi_{w1} = 0{,}9$ и механически обработанных центробежно-литых труб $\varphi_{w2} = 1$. При температуре 803 К (530° С) и более $\varphi_{w1} = 0{,}6$ и $\varphi_{w2} = 0{,}7$ соответственно. В диапазоне температур от 783 К (510° С) до 803 К (530° С) для определения $\varphi_{w1}$ или $\varphi_{w2}$ допускается линейная интерполяция.

4.3.3.2. Коэффициент снижения прочности кольцевых сварных соединений цилиндрических и конических оболочек, нагруженных давлением, принимают равным единице.

4.3.3.3. Если расстояние от края любого отверстия до оси сварного шва по направлению, перпендикулярному расчетному направлению,

$$l \leqslant \max\{0{,}5\sqrt{D_m(s-c)};\ 50 \text{ мм}\},$$

расчетный коэффициент снижения прочности определяют как произведение коэффициента снижения прочности сварного соединения и коэффициента снижения прочности отверстия

$$\varphi = \varphi_d \varphi_w \quad \text{или} \quad \varphi = \varphi_c \varphi_w.$$

В случае, если расстояние между осью сварного шва и кромкой ближайшего отверстия

$$l > \min\{0{,}5\sqrt{D_m(s-c)};\ 50 \text{ мм}\},$$

за расчетный коэффициент снижения прочности принимают минимальное значение $\varphi_d$, $\varphi_c$ или $\varphi_w$. Для бесшовных деталей $\varphi = \varphi_d$ или $\varphi = \varphi_w$. Для сварных деталей, не имеющих отверстия, $\varphi = \varphi_w$.

## 4.4. ФЛАНЦЫ, НАЖИМНЫЕ КОЛЬЦА И КРЕПЕЖНЫЕ ДЕТАЛИ

Рекомендуемая методика расчета по выбору основных размеров фланцев, нажимных колец и крепежных деталей приведена в приложении 10.

## 5. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

5.1.1. Поверочный расчет проводят после выполнения расчета по выбору основных размеров рассчитываемых элементов по их номинальным размерам.

5.1.2. Поверочный расчет проводят с учетом всех расчетных нагрузок и всех расчетных режимов эксплуатации. В один расчетный режим может быть включена группа режимов, если внешние нагрузки и температуры этих режимов не отличаются более чем на 5% от принятых расчетных значений.

5.1.3. Основными расчетными нагрузками являются:

внутреннее или наружное давление;

масса изделия и его содержимого;

дополнительные нагрузки (масса присоединенных изделий, изоляции трубопроводов и т. п.);

усилия от реакции опор и трубопроводов;

температурные воздействия;

вибрационные нагрузки;

сейсмические нагрузки.

5.1.4. Основными расчетными режимами эксплуатации являются:

затяг болтов и шпилек;

пуск;

стационарный режим;

работа системы аварийной защиты;

изменение мощности реактора;

остановка;

гидро- или пневмоиспытание;

нарушение нормальных условий эксплуатации;

аварийная ситуация.

5.1.5. При поверочном расчете используют физико-механические свойства основного металла и сварных швов, указанные в государственных или отраслевых стандартах или технических условиях. В случае отсутствия в этих документах необходимых данных допускается использовать данные, приведенные в табл. П1.1—П1.4 приложения 1 и приложении 6.

5.1.6. Нормами не регламентируются методы, применяемые для определения расчетных нагрузок, внутренних усилий, перемещений, напряжений и деформаций рассчитываемых элементов. Выбранный метод должен учитывать все расчетные нагрузки для всех расчетных случаев и давать возможность определить все необходимые расчетные группы категорий напряжений.

Ответственность за выбор того или иного метода несет организация, выполнявшая соответствующий расчет или экспе-

римент. Рекомендуемые методы расчета некоторых типовых узлов и деталей приведены в приложении 5.

5.1.7. При проведении поверочного расчета все напряжения в конструкции разделяют на категории. Напряжения, относящиеся к различным категориям, объединяют в группы категорий напряжений, которые сопоставляют с допускаемыми напряжениями.

5.1.8. При проведении поверочного расчета наплавленных или плакированных стенок напряжения в стенке и наплавке рассматривают с учетом температурных напряжений, вызванных разницей коэффициентов линейного расширения основного металла и наплавки.

## 5.2. КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

5.2.1. При проведении поверочного расчета используют следующие основные категории напряжений:

$\sigma_m$ — общие мембранные напряжения;
$\sigma_{mL}$ — местные мембранные напряжения;
$\sigma_b$ — общие изгибные напряжения;
$\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения;
$\sigma_T$ — общие температурные напряжения;
$\sigma_{TL}$ — местные температурные напряжения;
$\sigma_к$ — напряжения компенсации;
$\sigma_{mw}$ — средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызываемые механическими нагрузками.

Дополнительные категории напряжений, используемые при проведении расчетов, входящих в состав поверочного расчета, указаны непосредственно в соответствующих подразделах.

Для удобства проведения расчетов ниже приведены примеры разделения напряжений по категориям.

5.2.2. Примером напряжений, относящихся к категории общих мембранных напряжений, являются средние напряжения растяжения (или сжатия) по толщине стенки цилиндрической или сферической оболочки, вызываемые действием внутреннего или наружного давления.

5.2.3. Примерами напряжений, относящихся к категории местных мембранных напряжений являются:

1) мембранные напряжения от механических нагрузок в зонах соединения оболочек и фланцев;

2) мембранные напряжения от механических нагрузок в зонах присоединения патрубков и опор к сосудам.

5.2.4. Примерами напряжений, относящихся к категории общих изгибных напряжений, являются:

1) напряжения изгиба, вызываемые действием внешних сил и моментов, действующих на сосуд или трубопровод в целом;

2) напряжения изгиба, вызываемые действием давления на плоские крышки;

3) напряжения изгиба в нажимных кольцах и фланцах разъемных соединений, вызываемые затягом болтов и шпилек.

5.2.5. Примерами напряжений, относящихся в категории местных изгибных напряжений, являются:

1) напряжения изгиба, вызванные действием давления, в зонах соединения различных элементов (фланец и цилиндрическая обечайка корпуса, соединение обечайки корпуса и днища и т. п.);

2) напряжения изгиба в трубопроводах в зоне присоединения фланцев, вызванные действием затяга болтов и шпилек.

5.2.6. Примерами напряжений, относящихся к категории общих температурных напряжений, являются:

1) напряжения, вызываемые осевым перепадом температур в цилиндрической обечайке;

2) линейная часть напряжений в элементах в зонах соединения (фланец и цилиндрическая часть сосуда, патрубок и корпус сосуда, трубопровод и фланец, трубная доска и присоединяемые к ней трубы и т. п.);

3) напряжения, вызываемые перепадом температур по толщине плоских днищ и крышек;

4) напряжения в стыковых соединениях цилиндрических обечаек, выполняемых из разнородных материалов.

5.2.7. Примерами напряжений, относящихся к категории местных температурных напряжений, являются:

1) напряжения в центральной части длинных цилиндрических или сферических оболочек, вызываемые перепадом температур по толщине стенки, за исключением линейной составляющей напряжений, указанной в 2) п. 5.2.6;

2) напряжения на небольших участках перегрева (или охлаждения) в стенке сосуда или трубопровода;

3) напряжения в антикоррозионной облицовке и других биметаллических элементах, вызванные разностью коэффициентов линейного расширения материалов.

5.2.8. Примерами напряжений, относящихся к категории напряжений компенсации, являются:

1) напряжения растяжения (или сжатия), вызванные стеснением свободного расширения трубопровода;

2) напряжения кручения и изгиба в трубопроводах, вызванные самокомпенсацией трубопроводов.

5.2.9. Примерами напряжений, относящихся к категории местных напряжений в зонах концентрации, являются напряжения в зонах отверстий, галтелей, резьб и т. п. от тепловых и механических усилий, определяемые с учетом коэффициента концентрации напряжений.

5.2.10. При проведении поверочного расчета определяют напряжения каждой расчетной группы категории напряжений, по которым определяют приведенные напряжения, сопоставляемые с соответствующими допускаемыми напряжениями.

5.2.11. На основании анализа действующих нагрузок и температурных полей следует выбрать наиболее напряженные области сосудов и трубопроводов, причем для различных расчетных случаев эти области могут быть различными.

5.2.12. Используемые при расчетах на статическую и циклическую прочность группы категорий напряжений и их обозначения применительно к различным типам конструкций приведены в табл. 5.1, а для рассчитываемых зон — в табл. 5.2.

5.2.13. Наиболее типичные примеры групп категорий напряжений в конструкциях приведены в табл. 5.1.

## 5.3. ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

5.3.1. На основе анализа условий эксплуатации элементов конструкции устанавливается типовая физически возможная последовательность эксплуатационных режимов работы и нагружения, включая условия испытаний и нарушения нормальных условий эксплуатации. Режимы работы и нагружения, осуществляемые между пуском и остановом, например срабатывание аварийной защиты, следует располагать между указанными режимами.

5.3.2. Для наиболее нагруженных областей элемента конструкции упругим расчетом определяются значения шести составляющих напряжений без учета концентрации для принятой системы координат (декартовой, цилиндрической или сферической) и принятой последовательности по времени режимов работы и нагружения.

По шести составляющим напряженного состояния определяются значения главных напряжений. Наибольшему главному напряжению присваивают индекс $i$, а двум другим — индексы $j$, $k$ ($\sigma_i > \sigma_j > \sigma_k$), фиксируя таким образом главные площадки.

5.3.3. На выбранных зафиксированных главных площадках для всей принятой последовательности по времени режимов работы и нагружения определяются зависимости изменения главных напряжений $\sigma_i$, $\sigma_j$, $\sigma_k$.

5.3.4. Значения приведенных напряжений ($\sigma$) определяются для моментов времени $t_1$, $t_2$, ..., $t_l$, ..., $t_m$, где увеличение (уменьшение) абсолютного значения любой из составляющих главных напряжений сменяется их уменьшением (увеличением) по формулам

$$\left.\begin{aligned} (\sigma)_{ij,l} &= \sigma_{i,l} - \sigma_{j,l}; \\ (\sigma)_{jk,l} &= \sigma_{j,l} - \sigma_{k,l}; \\ (\sigma)_{ik,l} &= \sigma_{i,l} - \sigma_{k,l}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.1)$$

Таблица 5.1. **Примеры групп категорий напряжений в конструкциях**

| Тип конструкции | Расчетная группа категорий напряжений | Обозначение расчетной группы категорий напряжений | Обозначение составляющих категорий напряжений, входящих в данную расчетную группу |
|---|---|---|---|
| Корпуса реакторов, парогенераторов и сосудов | Приведенные общие мембранные напряжения | $(\sigma)_1$ | $\sigma_m$ |
| | Приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений | $(\sigma)_2$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b$ |
| | Размах приведенных напряжений, определяемый по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих температурных и компенсационных напряжений | $(\sigma)_{RV}$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b+\sigma_{bL}+\sigma_T+[\sigma_{km}$ или $\sigma_{kmL}]+\sigma_{kb}+\tau_{ks}$ |
| | Амплитуда приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных и компенсационных напряжений с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})_V$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b+\sigma_{bL}+\sigma_T+\sigma_{TL}+[\sigma_{km}$ или $\sigma_{kmL}]+\sigma_{kb}+\tau_{ks}$ с учетом концентрации напряжений |

*Продолжение табл. 5.1*

| Тип конструкции | Расчетная группа категорий напряжений | Обозначение расчетной группы категорий напряжений | Обозначение составляющих категорий напряжений, входящих в данную расчетную группу |
|---|---|---|---|
| Трубопроводы | Приведенные общие мембранные напряжения | $(\sigma)_1$ | $\sigma_m$ |
| | Приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих изгибных напряжений | $(\sigma)_2$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b$ |
| | Размах приведенных напряжений, определяемый по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих температурных напряжений и напряжений компенсации мембранных, кручения и изгиба | $(\sigma)_{RK}$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b+\sigma_{bL}+\sigma_T+[\sigma_{km}$ или $\sigma_{kmL}]+\tau_{k\delta}+\sigma_{kb}$ |
| | Амплитуда приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных напряжений, напряжений компенсации мембранных, кручения и изгиба с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})_K$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b+\sigma_{bL}+\sigma_T+\sigma_{TL}+[\sigma_{km}$ или $\sigma_{kmL}]+\tau_{k\delta}+\sigma_{kb}$ с учетом концентрации напряжений |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Компенсирующие устройства (торовые, сильфонные и др.) | Приведенные общие мембранные напряжения | $(\sigma)_1$ | $\sigma_m$ |
| | Амплитуда приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных напряжений с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})_V$ | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}]+\sigma_b+\sigma_{bL}+\sigma_T+\sigma_{TL}$ с учетом концентрации напряжений |
| Болты и шпильки | Средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызванные механическими нагрузками | $(\sigma)_1$ | $\sigma_{mw}$ |
| | Средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызванные механическими нагрузками и температурными воздействиями | $(\sigma)_{3w}$ | $\sigma_{mw}+\sigma_T$ |
| | Приведенные напряжения, определяемые по суммам составляющих средних напряжений растяжения по сечению болта или шпильки и общих изгибных напряжений, вызванных механическими нагрузками и температурными воздействиями, а также напряжений кручения | $(\sigma)_{4w}$ | $\sigma_{mw}+\sigma_T+\sigma_{bw}+\tau_{sw}$ |

*Продолжение табл. 5.1*

| Тип конструкции | Расчетная группа категорий напряжений | Обозначение расчетной группы категорий напряжений | Обозначение составляющих категорий напряжений, входящих в данную расчетную группу |
|---|---|---|---|
| | Амплитуда приведенных напряжений, определяемая по суммам составляющих средних напряжений растяжения по сечению болта или шпильки и общих изгибных напряжений, вызванных механическими нагрузками и температурными воздействиями, напряжений кручения и общих и местных температурных напряжений с учетом концентрации напряжений в резьбе | $(\sigma_{aR})_w$ | $\sigma_{mw}+\sigma_{bw}+\sigma_T+\sigma_{TL}+\tau_{sw}$ с учетом концентрации напряжений |

Таблица 5.2. **Примеры групп категорий в рассчитываемых зонах конструкций**

| Рассчитываемая зона | Вид нагружений | Категория определяемых напряжений | Расчетная группа категорий напряжений |
|---|---|---|---|
| Цилиндрическая часть (гладкая часть) | Внутреннее давление | Общие мембранные | $(\sigma)_1$ |
| | Внутреннее давление, температурный перепад по длине | Общие мембранные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | Внутреннее давление, температурный перепад по длине, температурный перепад по толщине стенки | Общие мембранные + общие температурные + местные температурные | $(\sigma_{aR})_V$ |
| Зона соединения фланца с цилиндрической частью корпуса | Внутреннее давление | Местные мембранные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поле температур во фланце, поле температур в цилиндрической части корпуса, усилия затяга | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aR})_V$ |
| Плоская крышка сосуда с отверстиями | Внутреннее давление | Общие изгибные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поле температур | Общие изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Общие изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aR})_V$ |

*Продолжение табл. 5.2*

| Рассчитываемая зона | Вид нагружений | Категория определяемых напряжений | Расчетная группа категорий напряжений |
|---|---|---|---|
| Зона соединения фланцев с эллиптическими или торосферическими крышками или днищами | Внутреннее давление | Местные мембранные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поле температур во фланце, поле температур в крышке (днище), затяг шпилек | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Эллиптические или торосферические крышки или днища с отверстиями | Внутреннее давление | Общие мембранные | $(\sigma)_1$ |
| | | Общие мембранные + общие изгибные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поле температур | Общие мембранные + общие изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Общие мембранные + общие изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Зона соединения цилиндрической части корпуса с днищем | Внутреннее давление | Местные мембранные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поля температур в цилиндрической части корпуса и днище | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Зона приварки патрубков, штуцеров или труб к сосуду (в корпусе) | Внутреннее давление | Местные мембранные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поля температур в корпусе и привариваемом элементе, усилия со стороны трубопровода (механические и от самокомпенсации) | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + напряжения компенсации | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + напряжения компенсации + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Зона патрубка | Внутреннее давление | Общие мембранные | $(\sigma)_1$ |
| | Внутреннее давление, поля температур в корпусе и привариваемом элементе, усилия со стороны трубопровода (механические и от самокомпенсации) | Общие или местные мембранные + общие изгибные | $(\sigma)_2$ |
| | | Общие или местные мембранные + общие изгибные + местные изгибные + общие температурные + напряжения компенсации | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Общие или местные мембранные + общие изгибные + местные изгибные + общие температурные + напряжения компенсации + местные температурные и местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| | Затяг шпилек, внутреннее давление | Общие изгибные | $(\sigma)_2$ |

*Продолжение табл. 5.2*

| Рассчитываемая зона | Вид нагружений | Категория определяемых напряжений | Расчетная группа категорий напряжений |
|---|---|---|---|
| | Затяг шпилек, внутреннее давление, поля температур в нажимном кольце и корпусе | Общие изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Общие изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Трубопроводы | Внутреннее давление | Общие мембранные | $(\sigma)_1$ |
| | Внутреннее давление, масса трубопровода | Общие или местные мембранные + общие изгибные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, масса трубопровода, усилия компенсации | Общие или местные мембранные + общие изгибные + напряжения компенсации + местные изгибные + общие температурные напряжения | $(\sigma)_{RK}$ |
| | | Общие или местные мембранные + общие изгибные + напряжения компенсации + местные изгибные + общие температурные напряжения с учетом местных напряжений в зоне концентрации | $(\sigma_{aF})_K$ |
| Трубные доски | Внутреннее давление | Общие изгибные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поля температур | Общие изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Общие изгибные + общие температурные + местные температурные с учетом местных напряжений в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Зона приварки трубных досок к корпусу сосуда | Внутреннее давление | Местные мембранные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поля температур в трубной доске и корпусе сосуда | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные с учетом местных напряжений в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Коллекторы | Внутреннее давление | Общие или местные мембранные | $(\sigma)_1$ или $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поля температур | Общие или местные мембранные + общие или местные изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Общие или местные мембранные + общие или местные изгибные + общие температурные + местные температурные с учетом местных напряжений в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Зона соединения штуцеров или труб с коллектором | Внутреннее давление | Местные мембранные | $(\sigma)_2$ |
| | Внутреннее давление, поля температур в корпусе и привариваемом элементе | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные | $(\sigma)_{RV}$ |
| | | Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |
| Торовое уплотнение (компенсатор) | Внутреннее давление | Общие мембранные | $(\sigma)_1$ |
| | Внутреннее давление, перемещение крышки или днища и корпуса, поля температур в компенсаторе | Общие или местные мембранные + общие температурные + местные изгибные + местные напряжения в зонах концентрации | $(\sigma_{aF})_V$ |

При упругом нагружении для начального $t_1$ и конечного $t_m$ моментов времени $\sigma_i=\sigma_j=\sigma_k=0$ или равняются постоянному напряжению, например от веса.

5.3.5. Определение напряжений аналитическими методами, например по теории оболочек, осуществляется в указанной в пп. 5.3.1—5.3.4 последовательности; определение напряжений численными методами в упругой области — в следующем порядке:

1) определяется зависимость местных напряжений для принятой последовательности режимов работы и нагружения;

2) выделяются номинальные напряжения от механических и тепловых нагрузок;

3) определяются приведенные напряжения.

5.3.6. Размах напряжений $(\sigma)_{RV}$ или $(\sigma)_{RK}$ определяется при поверочном расчете на статическую прочность по графикам изменений приведенных напряжений $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$ для всего процесса изменения напряжений и выбирается как наибольшее из следующих значений:

$$\{(\sigma)_{RV} \text{ или } (\sigma)_{RK}\}=\max\left\{\begin{array}{l}(\sigma)_{ij,\max}-(\sigma)_{ij,\min}\\(\sigma)_{jk,\max}-(\sigma)_{jk,\min}\\(\sigma)_{ik,\max}-(\sigma)_{ik,\min}\end{array}\right\}, \quad (5.2)$$

где $(\sigma)_{ij,\max}$, $(\sigma)_{jk,\max}$, $(\sigma)_{ik,\max}$ — алгебраически максимальные, а $(\sigma)_{ij,\min}$, $(\sigma)_{jk,\min}$, $(\sigma)_{ik,\min}$ — алгебраически минимальные напряжения для всего процесса изменения соответствующих приведенных напряжений.

Во всех случаях упругого нагружения значения напряжений

$$\left.\begin{array}{l}[(\sigma)_{ij,\max}, (\sigma)_{jk,\max}, (\sigma)_{ik,\max}]\geqslant 0;\\[(\sigma)_{ij,\min}, (\sigma)_{jk,\min}, (\sigma)_{ik,\min}]\leqslant 0.\end{array}\right\} \quad (5.3)$$

5.3.7. Общий процесс изменения во времени приведенных напряжений $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$ представляет собой ряд последовательных полуциклов. В пределах каждого полуцикла приведенное напряжение изменяется монотонно. Моменты времени, определяющие концы полуциклов, обозначаются 0, 1, 2, ... ..., $l$, ..., $m$.

Главные напряжения $\sigma_i$, $\sigma_j$, $\sigma_k$, распределенные в общем случае неравномерно по площади сечения (толщине стенки) элемента конструкции $A_s$, разделяются на мембранную $\sigma_m$ и дополнительную составляющую, принимаемую в качестве изгибной $\sigma_b$, и определяются в указанные моменты времени по формулам

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{mi}&=\frac{1}{A_s}\int_{A_s}\sigma_i(A_s)\,dA_s;\\ \sigma_{mj}&=\frac{1}{A_s}\int_{A_s}\sigma_j(A_s)\,dA_s;\\ \sigma_{mk}&=\frac{1}{A_s}\int_{A_s}\sigma_k(A_s)\,dA_s;\end{aligned}\right\}\qquad(5.4)$$

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{bi}&=\sigma_i-\sigma_{mi};\\ \sigma_{bj}&=\sigma_j-\sigma_{mj};\\ \sigma_{bk}&=\sigma_k-\sigma_{mk}.\end{aligned}\right\}\qquad(5.5)$$

Приведенные местные напряжения $(\sigma_L)_{ij}$, $(\sigma_L)_{jk}$, $(\sigma_L)_{ik}$ в конце $l$-го полуцикла определяют по формулам

$$\left.\begin{aligned}(\sigma_L)_{ij,l}&=K_{(\sigma)ij,l}\left[(\sigma)_{ij,l}-(\sigma)_{ij,l-1}\right]+(\sigma_L)_{ij,l-1};\\ (\sigma_L)_{jk,l}&=K_{(\sigma)jk,l}\left[(\sigma)_{jk,l}-(\sigma)_{jk,l-1}\right]+(\sigma_L)_{jk,l-1};\\ (\sigma_L)_{ik,l}&=K_{(\sigma)ik,l}\left[(\sigma)_{ik,l}-(\sigma)_{ik,l-1}\right]+(\sigma_L)_{ik,l-1},\end{aligned}\right\}\qquad(5.6)$$

где $K_{(\sigma)ij,l}$, $K_{(\sigma)jk,l}$, $K_{(\sigma)ik,l}$ — коэффициенты концентрации приведенных напряжений для напряжений $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$ в полуцикле от $l-1$ до $l$.

Коэффициент $K_{(\sigma)ij,l}$ рассчитывается, например, по формуле

$$K_{(\sigma)ij,l}=\frac{1}{(\sigma)_{ij,l}-(\sigma)_{ij,l-1}}\Big\{\left[\left(1-\mu_\sigma\right)K_{\sigma,mi}+\mu_\sigma\right]\left(\sigma_{mi,l}-\sigma_{mi,l-1}\right)+$$
$$+\left[\left(1-\mu_\sigma\right)K_{\sigma,bi}+\mu_\sigma\right]\left(\sigma_{bi,l}-\sigma_{bi,l-1}\right)-\left[\left(1-\mu_\sigma\right)K_{\sigma,mj}+\mu_\sigma\right]\times$$
$$\times\left(\sigma_{mj,l}-\sigma_{mj,l-1}\right)-\left[\left(1-\mu_\sigma\right)K_{\sigma,bj}+\mu_\sigma\right]\left(\sigma_{bj,l}-\sigma_{bj,l-1}\right)\Big\}.\qquad(5.7)$$

Здесь $K_{\sigma,mi}$, $K_{\sigma,bi}$, $K_{\sigma,mj}$, $K_{\sigma,bj}$ — теоретические коэффициенты концентрации мембранных составляющих $\sigma_{mi}$, $\sigma_{mj}$ и изгибных составляющих $\sigma_{bi}$, $\sigma_{bj}$ соответственно, определяемые экспериментально, по справочникам или приложению 3; $\mu_\sigma$ — коэффициент, зависящий от стеснения деформаций, соответствующий главному напряжению $\sigma_j$ в направлении $\sigma_i$ и напряжению $\sigma_i$ в направлении $\sigma_j$. При полном стеснении $\mu_\sigma=0{,}3$, а при его

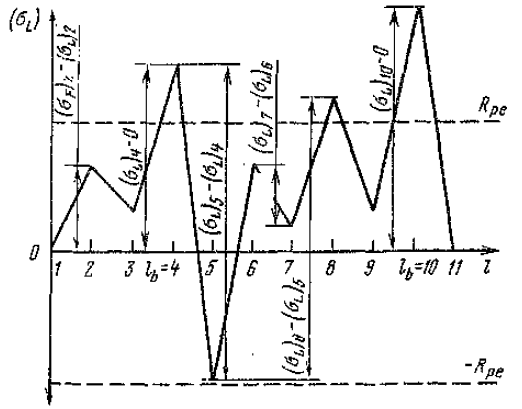



Рис. 5.1. График изменения местного приведенного напряжения

отсутствии $\mu_\sigma=0$. Если степень стеснения нельзя определить, то расчет выполняется при $\mu_\sigma=0$ и $\mu_\sigma=0{,}3$. При этом коэффициент концентрации принимается бо́льшим из двух полученных значений.

Для упрощения расчета допускается принимать $K_{\sigma,bi}=K_{\sigma,mi}$; $K_{\sigma,bj}=K_{\sigma,mj}$ и $\sigma_{mi}=\sigma_i$; $\sigma_{mj}=\sigma_j$; $\sigma_{bi}=\sigma_{bj}=0$.

5.3.8. Изменение какого-либо местного условного упругого приведенного напряжения $(\sigma_F)_l$ определяется с использованием графика изменения соответствующего приведенного напряжения $(\sigma_L)_l$. Пример графика приведен на рис. 5.1.

Если до момента времени $l$ напряжение $(\sigma_L)$ находилось в упругой области ($l=2$ на рис. 5.1), то $(\sigma_F)_l=(\sigma_L)_l$, а если в момент времени $l$ напряжение $(\sigma_L)_l$ находится в упругопластической области и приобретает в этот момент наибольшее абсолютное значение среди всех предшествующих положительных и отрицательных напряжений $(\sigma_L)$, то $(\sigma_F)_l$ определяют по формуле

$$(\sigma_F)_l=\operatorname{sign}\left[(\sigma_L)_l-(\sigma_L)_h\right]\left(\xi R_{pe}^T\right)^{\frac{\nu-1}{\nu+1}}\times$$

$$\times\left\{\frac{1+\nu}{2}\left[(\sigma_L)_l-(\sigma_L)_h\right]^2+\frac{1-\nu}{2}\left(\xi R_{pe}^T\right)^2\right\}^{\frac{1}{1+\nu}}+(\sigma_F)_h, \qquad (5.8)$$

где в данном случае $(\sigma_L)_h=(\sigma_F)_h=0$, а $\xi=1$.

В этом случае момент времени обозначается $l_b$ ($l_b=4$ и $l_b=10$), а показатель упрочнения $\nu$ и предел пропорциональности $R_{pe}^T$ определяются по формулам

$$\nu=\frac{0{,}73\lg\left[\left(1+1{,}4\cdot10^{-2}Z^T\right)\dfrac{R_m^T}{R_{p0,2}^T}\right]}{\lg\left[\dfrac{2{,}3\lg\dfrac{100}{100-Z^T}}{2\cdot10^{-3}+\dfrac{R_{p0,2}^T}{E^T}}\right]}; \tag{5.9}$$

$$R_{pe}^T=\left[\frac{R_{p0,2}^T}{\left(2\cdot10^{-3}E^T+R_{p0,2}^T\right)^{\nu}}\right]^{\frac{1}{1-\nu}}. \tag{5.10}$$

Показатель упрочнения $\nu$ допускается выбирать по табл. 5.3 в зависимости от значения $R_{p0,2}^T/R_m^T$ и $Z^T$.

Таблица 5.3. **Значение показателя упрочнения $\nu$**

| $R_{p0,2}^T/R_m^T$ | $Z^T$, % | | |
|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30—60 |
| 0,3 | 0,29 | 0,27 | 0,25 |
| 0,5 | 0,21 | 0,17 | 0,19 |
| 0,7 | 0,11 | 0,11 | 0,13 |
| 0,9 | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| 0,95 | 0,02 | 0,03 | 0,04 |
| 1,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

При промежуточных значениях $R_{p0,2}^T/R_m^T$ значения $\nu$ определяются линейной интерполяцией.

Если в рассматриваемой зоне расположен сварной шов, то значения $R_{pe}^T$ и $\nu$ принимаются для металла шва, если они меньше, чем для основного металла.

При температуре выше температуры $T_t$ значение $R_{pe}^T$ определяют по изохронной кривой деформирования за время нагружения элемента конструкции в течение рассматриваемого полуцикла.

Длительность полуцикла равна времени изменения напряжений от минимального (максимального) до максимального (минимального) значения. При расчете напряжений в процессе пуска, выхода на режим после какого-либо переходного режима и работы на стационарном режиме до следующего переходного режима при температурах выше температуры $T_t$ необходимо учитывать среднее время работы на стационарном режиме между соответствующими переходными режимами.

При температуре, превышающей температуру $T_t$, показатель упрочнения определяют по формуле

$$\nu=\frac{\lg\left(\sigma^T/R_{p0,2t}^T\right)}{\lg\left(e^T/e_{0,2t}^T\right)},$$

где $R^T_{p0,2t}$; $\sigma^T$ — предел текучести и напряжение, соответствующее упругопластической деформации $e^T$, принимаемые по изохронной кривой деформирования для длительности и температуры полуцикла; $e^T_{0,2t}$ — деформация, соответствующая пределу текучести $R^T_{p0,2}$; $e^T$ — деформация, соответствующая $\sigma^T$ (не менее 2%).

Если до момента времени $l$ хотя бы 1 раз была использована формула (5.8), то для определения напряжения $(\sigma_F)_l$ рассматривается полуцикл $l$, $h$, где $l_b \leqslant h \leqslant l$.

При увеличении (уменьшении) напряжения $(\sigma_L)$ от момента времени $l-1$ до $l$ индекс $h$ присваивается наименьшему (наибольшему) значению напряжения $(\sigma_L)$. При этом значения напряжения от $(\sigma_L)_h$ до $(\sigma_L)_{l-1}$ не должны превышать (или соответственно быть меньше) значения $(\sigma_L)_l$.

Если $|(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h| \leqslant 2R^T_{pe}$ ($l=7$ на рис. 5.1), то $(\sigma_F)_l$ определяется по формуле

$$(\sigma_F)_l = (\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h + (\sigma_F)_h. \qquad (5.11)$$

Если $|(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h| > 2R^T_{pe}$ ($l=5$ и $l=8$), то $(\sigma_F)_l$ определяют по формуле (5.8), в которой коэффициент $\xi$ принимается равным 2.

При переменной в течение полуцикла температуре вычисление значений $R^T_{pe}$, $\nu$ проводится для максимальной и минимальной температур полуцикла по соответствующим значениям $R^T_{p0,2}$, $R^T_m$, $Z^T$, $E^T$. Значение $R^T_{pe}$ принимается равным полусумме соответствующих значений при максимальной и минимальной температурах полуцикла, а показатель $\nu$ равным минимальному из его значений в интервале температур полуцикла. Допускается использование значений $R^T_{pe}$, $\nu$ при максимальной температуре полуцикла.

Показатель упрочнения $\nu$ при определении его по табл. 5.3 принимается равным его минимальному значению в интервале температур полуцикла.

Допускается принимать $R^T_{pe}$ равным $R^T_{p0,2}$, а показатель упрочнения $\nu=0$. В этом случае значение $R^T_{p0,2}$ равно полусумме пределов текучести при максимальной и минимальной температурах полуцикла или пределу текучести при максимальной температуре полуцикла.

Расчет по формуле (5.8) допускается применять при выполнении следующих условий:

$$\frac{|(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h|}{K_{(\sigma)}} \leqslant 4R^T_{pe} \qquad (5.12)$$

и

$$\frac{|(\sigma_L)_{l_b}|}{K_{(\sigma)}} \leqslant 2R^T_{pe}. \qquad (5.13)$$

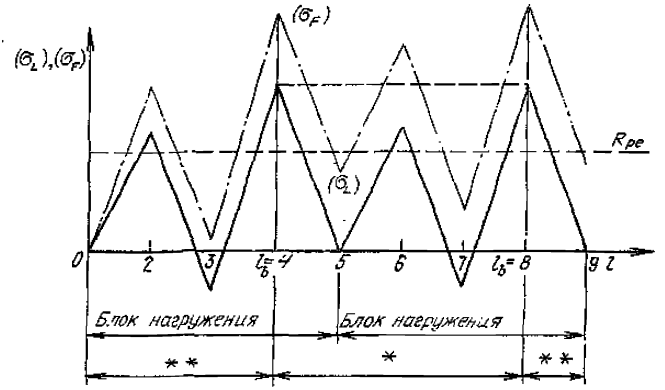



Рис. 5.2. График изменения местного условного упругого приведенного напряжения $(\sigma_F)$ для двух одинаковых соседних блоков напряжений $(\sigma_L)$: * — полуциклы между наибольшими значениями $(\sigma_L)_h$; ** — остальные полуциклы

Если при расчете $(\sigma_F)_l$ и определении графика его изменения используется хотя бы 1 раз формула (5.8), то следует рассмотреть последовательно два одинаковых блока изменения напряжений $(\sigma_L)$ (см. пример на рис. 5.2). В этом случае число полуциклов (циклов) каждого типа между абсолютно наибольшими значениями $(\sigma_L)_l$ принимают равным ожидаемому при эксплуатации числу блоков нагружения за вычетом 1, число остальных равно 1.

5.3.9. Местное условное упругое приведенное напряжение $(\sigma_F)$ при использовании эффективного коэффициента концентрации $K_{ef}$ определяется по формуле

$$(\sigma_F)_l = \frac{K_{ef}}{K_{(\sigma)}}\left[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h\right] + (\sigma_F)_h \qquad (5.14)$$

или

$$(\sigma_F)_l = K_{ef}\left[(\sigma)_l - (\sigma)_h\right] + (\sigma_F)_h. \qquad (5.15)$$

5.3.10. Эффективный коэффициент концентрации местного приведенного напряжения $K_{ef}$ определяется при испытаниях на усталость.

Геометрия, состояние поверхности, номинальные напряжения и градиенты местных напряжений в зоне концентрации испытываемого элемента, модели или образца, их материал и термообработка, условия нагружения (температура, среда) должны соответствовать натурному элементу конструкции.

Напряжения без учета концентрации при определении $K_{ef}$ не должны превышать пределы, установленные для соответствующих категорий напряжений при расчете статической прочности.

Применение $K_{ef}$ при расчете местных приведенных напряжений должно быть согласовано со способом обработки экспериментальных данных при его определении.

При $(\sigma_{aL}) \leqslant R^T_{p0,2}$ эффективный коэффициент концентрации напряжений определяется по формуле

$$K_{ef} = 1 + q(K_\sigma - 1), \tag{5.16}$$

где $q$ — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений $(q \leqslant 1)$.

Если $(\sigma_{aL}) = K_\sigma(\sigma_a) \geqslant R^T_{-1}$, то коэффициент $q$ вычисляется по формуле

$$q = q_0 + \frac{1 - q_0}{R^T_{p0,2} - R^T_{-1}}\left[K_\sigma(\sigma_a) - R^T_{-1}\right], \tag{5.17}$$

а если $K_\sigma(\sigma_a) < R^T_{-1}$, то $q$ принимается равным $q_0$, где $q_0$ — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений, определенный при амплитуде местных напряжений, равной пределу выносливости $R^T_{-1}$, и выбираемый по табл. 5.4.

5.3.11. При расчете приведенных местных условных упругих напряжений от механических и температурных нагрузок в сварных соединениях с неполным проплавлением, выполняемых аустенитными электродами и используемых для присоединения элементов антикоррозионных рубашек, эффективный коэффициент концентрации осевых напряжений любой категории

Таблица 5.4. **Значения коэффициента чувствительности материала $q_0$**

| $R^T_{p0,2}/R^T_m$ | $q_0$ | Зона концентрации напряжений в элементах конструкций |
|---|---|---|
| 0,4—0,8 | 1,0 | Опорные устройства сосудов, отверстия для шпилек крепления крышек к корпусам сосудов, отверстия крышек и днищ при радиусе скругления более 40 мм |
| 0,4 | 0,9 | Трубные доски, трубные скругления, переход от трубопроводов к фланцам при радиусе скругления от 10 до 40 мм |
| 0,6 | 0,95 | |
| 0,8 | 1,0 | |
| 0,4 | 0,7 | Скругления в вершинах пазов и опорных буртов при радиусе скругления от 4 до 10 мм |
| 0,6 | 0,8 | |
| 0,8 | 0,9 | |
| 0,4 | 0,3 | Метрическая резьба шпилек, болтов, гаек при радиусе скругления менее 1 мм |
| 0,6 | 0,6 | |
| 0,8 | 0,8 | |

Примечание. При промежуточном значении $R^T_{p0,2}/R^T_m$ значение $q_0$ определяется линейной интерполяцией.

следует определять в зависимости от амплитуды изгибной $\sigma_{ab}$ и равномерно распределенной $\sigma_{am}$ составляющих напряжения без учета концентрации по формулам

$$K_{ef}=3{,}5+2{,}8\cdot 10^{3}\left(\frac{\sigma_{am}}{\sigma_{am}+\sigma_{ab}}-0{,}2\right)^{2{,}5}\left(\frac{\sigma_{am}+\sigma_{ab}}{E^{T}}-2\cdot 10^{-3}\right)$$

при $2\cdot 10^{-3}\leqslant(\sigma_{am}+\sigma_{ab})/E^{T}\leqslant 4\cdot 10^{-3}$;

$$0{,}2\leqslant\sigma_{am}/(\sigma_{am}+\sigma_{ab})\leqslant 1 \text{ и}$$

$K_{ef}=3{,}5$ при $(\sigma_{am}+\sigma_{ab})/E^{T}\leqslant 2\cdot 10^{-3}$; $\sigma_{am}/(\sigma_{ab}+\sigma_{am})\leqslant 0{,}2$

или при $\sigma_{am}=0$ независимо от $\sigma_{ab}$.

Для кольцевых мембранных напряжений влияние концентрации не учитывают. Высота сварного шва должна быть не меньше толщины самой тонкой из соединяемых деталей в месте сварки. При возникновении в сварных соединениях с неполным проплавлением пластических циклических деформаций значения условных упругих напряжений без учета концентрации в сечении сварного соединения необходимо определить из упругопластического расчета.

5.3.12. Местное условное упругое напряжение ($\sigma_F$) в резьбе резьбового соединения определяется в соответствии с п. 5.3.8. Напряжения ($\sigma_L$) рассчитываются с учетом коэффициента $K_\sigma$, определяемого для метрической резьбы, по формуле

$$K_\sigma=K_S\left(1+1{,}57\sqrt{S_z/R}\right), \qquad (5.18)$$

где $K_S$ — коэффициент, зависящий от типа гайки; $S_z$ — шаг резьбы; $R$ — радиус закругления в основании витка.

Для стандартной гайки сжатия коэффициент $K_S=1$, а для гайки растяжения-сжатия при длине растянутой зоны, равной диаметру резьбовой части, $K_S=0{,}75$.

Коэффициент $K_S$ для промежуточных длин растянутой зоны гайки растяжения-сжатия устанавливают линейной интерполяцией.

При увеличении высоты гайки сжатия от 0,8 диаметра резьбовой части до 1,25 и выше $K_S$ уменьшается от 1 до 0,9.

При расчете резьбовой части шпильки, ввворачиваемой во фланец корпуса, учитывается влияние на $K_\sigma$ различия механических свойств материала шпильки и фланца. При этом при длине ввернутой части шпильки, равной ее диаметру и более, коэффициент $K_S=0{,}75$.

В случае различия предела прочности материалов шпильки $R_{mw}^{T}$ и фланца $R_{mf}^{T}$ коэффициент концентрации определяется по формуле

$$K_\sigma=K_S K_w\left(1+1{,}57\sqrt{S_z/R}\right), \qquad (5.19)$$

где значение коэффициента $K_w$ определяют по табл. 5.5.

Таблица 5.5 **Значение коэффициента $K_w$**

| $R^T_{mf}/R^T_{mw}$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_w$ | 0,7 | 0,8 | 0,87 | 0,95 | 0,95 | 1,0 |

Местное напряжение ($\sigma_F$) в резьбе может быть определено с использованием эффективного коэффициента концентрации $K_{ef}$ по формуле (5.14) или (5.15). Если напряжение ($\sigma_L$) не выходит за пределы упругости, то коэффициент $K_{ef}$ определяется по формуле (5.16). Если напряжение ($\sigma_L$) выходит за пределы упругости, то для резьбового соединения с метрической резьбой из стали с $Z^T \geqslant 30\%$ при контролируемом профиле резьбы с радиусом закругления в основании витка $R$ допускается принимать $K_{ef} = K_\sigma$.

Для контролируемых метрических резьб с впадиной без закругления из сталей с $Z^T \geqslant 30\%$ значение $K_{ef} = 1{,}2K_\sigma$, где $K_\sigma$ — коэффициент концентрации напряжений в резьбе с шагом и радиусом закругления $R = 0{,}11S_z$.

5.3.13. При расчете тороидальных герметизирующих компенсаторов (ТГК) допускаемое число циклов для заданных местных условных упругих напряжений принимают минимальным из двух значений, определяемых:

в месте присоединения компенсатора к массивным деталям (крышка, корпус);

в оболочке компенсатора между местами присоединения.

Местное меридиональное напряжение в месте присоединения определяют (при $2R_н/s \geqslant 5$, где $R_н$ — местный наружный радиус кривизны поперечного сечения оболочки; $s$ — толщина стенки) умножением меридионального напряжения на наружной поверхности от тепловых и механических усилий, рассчитанного без учета концентрации, как в тонкостенной оболочке, на эффективный коэффициент концентрации $K_{ef}$.

Для оболочек из аустенитных сталей с толщиной стенки $s \leqslant 6$ мм коэффициент концентрации определяют по формуле $K_{ef} = 1{,}45 - 0{,}013R$, где $R$ — радиус сопряжения в месте присоединения, мм.

Для неплавного сопряжения (уступ до 2 мм при $R \geqslant 15$ мм) значение $R$ принимают равным нулю. При определении кольцевых напряжений концентрация не учитывается.

На участке между местами присоединений компенсатора, если

$$2R_н/(s + \Delta s_1 + \Delta s_2) \geqslant 3{,}5,$$

где $\Delta s_1$ и $\Delta s_2$ — высота усиления стыкового сварного шва на вогнутой и выпуклой поверхностях ТГК соответственно, изгибное меридиональное напряжение определяют умножением из-

гибного меридионального напряжения, рассчитанного как в тонкостенной оболочке, на корректирующие коэффициенты

$$K_1 = \left(1 + 0{,}6\frac{s + \Delta s_1 + \Delta s_2}{R_н + \Delta s_2}\right)\left(1 + \frac{2\Delta s_1}{s}\right)$$

(вогнутая поверхность) и

$$K_2 = \left(1 - 0{,}5\frac{s + \Delta s_1 + \Delta s_2}{R_м + \Delta s_2}\right)\left(1 + \frac{2\Delta s_2}{s}\right)$$

(выпуклая поверхность), где $R_м$ — местный внутренний радиус кривизны поперечного сечения оболочки.

5.3.14. При определении местных приведенных напряжений допускается представление типовой последовательности по времени эксплуатационных режимов работы и нагружения в виде отдельных блоков с учетом памяти об истории нагружения при переходе от одного блока к другому.

5.3.15. Формирование циклов напряжений проводится таким образом, чтобы каждый раз на трех графиках изменения напряжений $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$ для выбранной последовательности по времени эксплуатационных режимов работы и нагружения из остающихся участков была получена наибольшая возможная амплитуда местного приведенного напряжения.

По трем графикам местных приведенных напряжений устанавливается наибольшее по абсолютному значению условное упругое напряжение $(\sigma_F^*)_{max}$ для всего процесса изменения напряжений.

## 5.4. РАСЧЕТ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

5.4.1. При расчете на статическую прочность проверяют выполнение условий прочности применительно к расчетным нагрузкам, указанным в п. 5.1.3, кроме сейсмических и вибрационных нагрузок, и ко всем эксплуатационным режимам, указанным в п. 5.1.4.

5.4.2. Напряжения, определенные при расчете на статическую прочность элементов оборудования и трубопроводов, не должны превышать значений, указанных в табл. 5.6. Значения $[\sigma]$, $[\sigma]_c$ и $[\sigma]_w$ определяют в соответствии с указаниями разд. 3.

5.4.3. Средние напряжения смятия не должны превышать $1{,}5R^T_{p0,2}$. Если расстояние от края зоны приложения нагрузки до свободной кромки превышает размеры зоны, на которой действует нагрузка, допускаемые напряжения могут быть увеличены на 25%.

5.4.4. Средние касательные напряжения, вызванные действием механических нагрузок, не должны превышать 0,5 $[\sigma]$ (в резьбах $0{,}25R^T_{p0,2}$).

5.4.5. Средние касательные напряжения, вызванные действием механических нагрузок и температурными воздействиями, не должны превышать $0{,}65\,[\sigma]$ (в резьбах $0{,}32R^T_{p0,2}$).

5.4.6. При гидравлических (пневматических) испытаниях приведенные общие мембранные напряжения в оборудовании или трубопроводе не должны превышать $1{,}35\,[\sigma]^{Th}$, а приведенные напряжения, определенные по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений,— $1{,}7\,[\sigma]^{Th}$. Напряжения $\sigma_{mw}$ в болтах и шпильках не должны превышать $0{,}7R^{Th}_{p0,2}$.

5.4.7. При оценке статической прочности по размахам напряжений $(\sigma)_{RV}$ или $(\sigma)_{RK}$ (см. табл. 5.6) максимальные и минимальные абсолютные значения приведенных напряжений, входящих в определение этой категории, не должны превышать $R^T_m$.

5.4.8. Выполнение требований табл. 5.6 и п. 5.4.7 по размахам напряжений не является обязательным в тех случаях, когда возможное при эксплуатации искажение формы конструкции, связанное с невыполнением вышеуказанных требований, не может повлиять на нормальную эксплуатацию рассчитываемого узла (нет нарушения герметичности различных соединений, отсутствует заклинивание подвижных устройств, нет недопустимого искажения проходных сечений, определяющих расход теплоносителя, нет недопустимых деформаций сопряженных деталей и т. п.).

Необходимость удовлетворения требования по группам категорий $(\sigma)_{RV}$ и $(\sigma)_{RK}$ должна устанавливаться конструкторской (проектной) организацией.

## 5.5. РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

5.5.1. Цилиндрические оболочки под наружным давлением.

5.5.1.1. Расчет проводят для гладких цилиндрических оболочек, находящихся под действием всестороннего или бокового наружного давления. При боковом давлении отсутствует давление на торцевые поверхности оболочки.

5.5.1.2. Гладкими считаются цилиндрические оболочки, на расчетной длине которых отсутствуют подкрепленные отверстия с диаметром, превышающим $d_0$ (см. п. 4.3.1.4), кольцевые и спиральные ребра жесткости или другие укрепления. Продольные или спиральные ребра жесткости с углом до 30° к образующей не рассматриваются как укрепление от действия наружного давления.

5.5.1.3. Рассматривается гладкая цилиндрическая оболочка на расчетной длине.

Если цилиндрическая оболочка с торцов закрыта приварными выпуклыми днищами, за расчетную длину принимают длину

Таблица 5.6. **Расчетные группы категорий напряжений**

| Тип конструкции | Расчетный случай (режим) | $(\sigma)_1$ | $(\sigma)_2$ | $(\sigma)_{3w}$ | $(\sigma)_{4w}$ | $(\sigma)_{kv}$ | $(\sigma)_{RK}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Элементы корпусов реакторов, парогенераторов, сосудов | НУЭ | $[\sigma]$ | $1{,}3\,[\sigma]$ | — | — | $(2{,}5-R^T_{p0,2}/R^T_m)\,R^T_{p0,2}$, но не более $2R^T_{p0,2}$ | — |
| | ННУЭ | $1{,}2\,[\sigma]$ | $1{,}6\,[\sigma]$ | — | — | — | — |
| | АС | $1{,}4\,[\sigma]$ | $1{,}8\,[\sigma]$ | — | — | — | — |
| Трубопроводы | НУЭ | $[\sigma]$ | $1{,}3\,[\sigma]$ | — | — | — | $\left(2{,}5-\frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}\right)R^T_{p0,2}$, но не более $2R^T_{p0,2}$ |
| | ННУЭ | $1{,}2\,[\sigma]$ | $1{,}6\,[\sigma]$ | — | — | — | |
| Компенсирующие устройства | НУЭ | $[\sigma]$ | — | — | — | — | — |
| | ННУЭ | $1{,}2\,[\sigma]$ | — | — | — | — | — |
| Болты и шпильки | НУЭ | $[\sigma]_w$ | — | $1{,}3\,[\sigma]_w$ | $1{,}7\,[\sigma]_w$ | — | — |
| | ННУЭ | $1{,}2\,[\sigma]_w$ | — | $1{,}6\,[\sigma]_w$ | $2{,}0\,[\sigma]_w$ | — | — |
| | АС* | $1{,}4\,[\sigma]_w$ | — | $1{,}8\,[\sigma]_w$ | $2{,}4\,[\sigma]_w$ | — | — |
| Страховочные корпуса и защитные оболочки | Разгерметизация защищаемого оборудования или трубопроводов | $[\sigma]_c$ | $1{,}3\,[\sigma]_c$ | — | — | — | — |

* Рассматривается только для корпусов реакторов.

цилиндрической оболочки, увеличенную на длину отбортованного цилиндрического участка и на $H_m/3$ каждого днища.

Для цилиндрической оболочки, закрытой фланцевыми соединениями или плоскими днищами, за расчетную длину принимают длину оболочки между фланцами или между плоскими днищами.

5.5.1.4. Формулы применены при выполнении следующих условий:

$$0{,}005 \leqslant (s-c)/D_m \leqslant 0{,}1; \quad D_m/L \leqslant 3; \quad a \leqslant 2\%,$$

где $a = 200\,(D_{a_{max}} - D_{a_{min}})/(D_{a_{max}} + D_{a_{min}})$; $D_{a_{max}}$, $D_{a_{min}}$ — максимальный и минимальный наружные диаметры, измеренные в одном поперечном сечении цилиндрической оболочки.

5.5.1.5. Критическая длина

$$L_{kr} = 1{,}2 D_m \sqrt{\frac{D_m}{s-c}}.$$

5.5.1.6. Критическое напряжение

$$\sigma_{kr} = 1{,}1 E^T \left(\frac{s-c}{D_m}\right)^2 \quad \text{для} \quad L \geqslant L_{kr};$$

$$\sigma_{kr} = 1{,}3 E^T \frac{D_m}{L} \left(\frac{s-c}{D_m}\right)^{1.5} \quad \text{для} \quad D_m/3 < L < L_{kr}.$$

5.5.1.7. Критическое давление

$$p_{kr} = 2\sigma_{kr}\left(\frac{s-c}{D_m}\right).$$

5.5.1.8. Допускаемое наружное давление

$$[p_a] = 0{,}5\xi p_{kr},$$

где поправочный коэффициент

$$\xi = \min\left\{0{,}7;\ \frac{\lambda}{1+\lambda}\right\}, \quad \text{где} \quad \lambda = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr}}.$$

5.5.1.9. Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполняется условие

$$p_a \leqslant [p_a].$$

5.5.2. Цилиндрическая оболочка под действием осевой силы.

5.5.2.1. Формулы применимы для расчета гладких цилиндрических оболочек без продольных ребер жесткости.

Спиральные ребра жесткости под углом более 60° к образующей не рассматриваются как укрепление от действия осевой силы.

5.5.2.2. Расчетную длину оболочки принимают согласно п. 5.5.1.3.

5.5.2.3. Формулы применимы при выполнении следующих условий:

$$0{,}05 \leqslant (s-c)/D_m \leqslant 0{,}2.$$

5.5.2.4. Расчетное осевое напряжение сжатия

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D_m (s-c)}.$$

5.5.2.5. Для определения значения допускаемого напряжения находят два значения критического напряжения:

напряжение первого рода — из условия общей потери устойчивости цилиндрического элемента как длинного стержня;

напряжение второго рода — из условия местной потери устойчивости цилиндрической тонкостенной оболочки.

5.5.2.6. Критическое напряжение первого рода

$$\sigma_{kr\,1} = 1{,}2E^T \left(\frac{D_m}{\eta L}\right)^2,$$

где $\eta = 1$, если оба конца цилиндрической оболочки шарнирно оперты; $\eta = 0{,}5$, если оба конца оболочки жестко заделаны; $\eta = 0{,}7$, если один конец оболочки шарнирно оперт, а другой жестко заделан.

5.5.2.7. Критическое напряжение второго рода

$$\sigma_{kr\,2} = 1{,}2E^T (s-c)/D_m.$$

5.5.2.8. Допускаемое осевое напряжение сжатия

$$[\sigma_c] = \min\{[\sigma_c]_1;\ [\sigma_c]_2\},$$

где $[\sigma_c]_1 = 0{,}5\xi_1\sigma_{kr\,1}$; $[\sigma_c]_2 = 0{,}5\xi_2\sigma_{kr\,2}$,

поправочные коэффициенты

$$\xi_1 = \min\{0{,}7;\ \lambda_1/(1+\lambda_1)\},\ \lambda_1 = R^T_{p0,2}/\sigma_{kr\,1};$$

$$\xi_2 = \min\{0{,}25;\ \lambda_2/(1+\lambda_2)\},\ \lambda_2 = R^T_{p0,2}/\sigma_{kr\,2}.$$

5.5.2.9. Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполняется условие

$$\sigma_c \leqslant [\sigma_c].$$

5.5.3. Цилиндрическая оболочка при совместном действии наружного давления и осевой силы.

5.5.3.1. Формулы применимы для гладких цилиндрических оболочек без кольцевых, спиральных или продольных ребер жесткости и других видов укрепления (гофры и др.).

5.5.3.2. Для рассматриваемого случая должны выполняться условия, приведенные в пп. 5.5.1.1, 5.5.1.3, 5.5.1.4.

5.5.3.3. Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполняется условие

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma_c]}+\frac{p_a}{[p_a]}\leqslant 1{,}0,$$

где допускаемое наружное давление определяется согласно п. 5.5.1, а расчетное осевое напряжение сжатия $\sigma_c$ и допускаемое осевое напряжение сжатия $[\sigma_c]$ — согласно п. 5.5.2.

5.5.4. Выпуклые днища под наружным давлением.

5.5.4.1. Формулы предназначены для расчета выпуклых днищ полусферической и эллиптической форм, находящихся под действием давления, равномерно распределенного по наружной поверхности.

Допускается применение формул для выпуклых днищ сферической формы. В сферических (тарельчатых) днищах поверхность имеет форму сегмента сферы.

5.5.4.2. Формулы применимы при выполнении следующих условий:

$$0{,}005\leqslant(s-c)/D_m\leqslant 0{,}1;\quad H_m/D_m\geqslant 0{,}2.$$

5.5.4.3. Критическое напряжение

$$\sigma_{kr}=1{,}2E^T\left(\frac{2H_m}{D_m}\right)\left(\frac{s-c}{D_m}\right).$$

5.5.4.4. Критическое давление

$$p_{kr}=4\sigma_{kr}\left(\frac{2H_m}{D_m}\right)\left(\frac{s-c}{D_m}\right).$$

5.5.4.5. Допускаемое наружное давление

$$[p_a]=0{,}5\xi p_{kr},$$

где *поправочный коэффициент*

$$\xi=\min\{0{,}15;\ \lambda/(1+\lambda)\},\ \text{где}\ \lambda=R^T_{p0,2}/\sigma_{kr}.$$

5.5.4.6. Устойчивость выпуклого днища обеспечена, если выполняется условие п. 5.5.1.9.

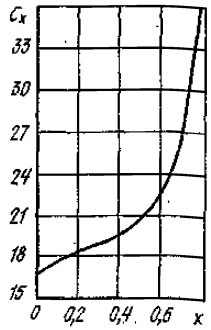
5.5.5. Конические переходы под наружным давлением.

5.5.5.1. Формулы применимы для расчета на наружное давление гладких конических переходов с углом конусности $\alpha$, удовлетворяющих условиям

$$0{,}005\leqslant\frac{s-c}{D_{0m}}\leqslant 0{,}1;\quad 10\leqslant\alpha\leqslant 60°;$$

$$0.005\leqslant\frac{s-c}{D_m}\leqslant 0{,}1,$$

Рис. 5.3. График для определения коэффициента $C_x$




где $D_{0m}$ и $D_m$ — средние диаметры оснований конического перехода ($D_{0m} < D_m$), мм.

5.5.5.2. При $\alpha < 10°$ конический переход можно считать цилиндрической оболочкой, длина которой равна высоте конуса, а средний диаметр равен диаметру большего основания. Толщину стенки цилиндрической оболочки принимают равной толщине стенки конического перехода.

5.5.5.3. Критическое напряжение

$$\sigma_{kr} = 0{,}5 C_x E^T \sin\alpha \cos^{1/2}\alpha \left(\frac{s-c}{D_m}\right)^{3/2},$$

где $C_x$ определяется по графику рис. 5.3 в зависимости от значения $x = D_{0m}/D_m$ или по формуле

$$C_x = \sum_{k=1}^{k=5} a_k (1-x)^{k-3} \quad \text{при} \quad 0 < x < 0{,}8,$$

где $a_1 = 1{,}098$; $a_2 = -0{,}823$; $a_3 = 16{,}250$; $a_4 = 6{,}936$; $a_5 = -6{,}603$.

На границах промежутка

$$C_0 = 17; \quad C_{0.8} = 38.$$

5.5.5.4. Критическое давление

$$p_{kr} = 2\sigma_{kr} \left(\frac{s-c}{D_m}\right) \cos\alpha.$$

5.5.5.5. Допускаемое наружное давление

$$[p_a] = 0{,}5 \xi p_{kr},$$

где поправочный коэффициент

$$\xi = \min\{0{,}7;\ \lambda/(1+\lambda)\}, \quad \text{где} \quad \lambda = R^T_{p0,2}/\sigma_{kr}.$$

5.5.5.6. Устойчивость конического перехода обеспечена, если выполняется условие п. 5.5.1.9.

5.5.6. Конические переходы под действием осевой силы.

5.5.6.1. Формулы применимы для расчета гладких конических переходов, находящихся под действием осевой силы, удовлетворяющих условиям

$$0{,}005 \leqslant (s-c)/D_{0m} \leqslant 0{,}1; \quad 10 \leqslant \alpha \leqslant 60°;$$

$$0{,}005 \leqslant (s-c)/D_m \leqslant 0{,}1.$$

5.5.6.2. При $\alpha < 10°$ конический переход можно считать цилиндрической оболочкой, длина которой равна высоте конуса, а средний диаметр равен диаметру большего основания.

Толщину стенки цилиндрической оболочки принимают равной толщине стенки конического перехода.

5.5.6.3. Расчетное осевое напряжение сжатия

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D_{0m}(s-c)\cos\alpha}.$$

5.5.6.4. Критическое напряжение

$$\sigma_{kr} = 1{,}2E^T\left(\frac{s-c}{D_{0m}}\right)\cos\alpha.$$

5.5.6.5. Допускаемое напряжение сжатия

$$[\sigma_c] = 0{,}5\xi\sigma_{kr},$$

где поправочный коэффициент

$$\xi = \min\{0{,}25;\ \lambda/(1+\lambda)\},\ \text{где}\ \lambda = R^T_{p0,2}/\sigma_{kr}.$$

5.5.6.6. Устойчивость конического перехода обеспечена, если выполняется условие п. 5.5.2.9.

5.5.7. Конические переходы при совместном действии наружного давления и осевой силы.

Устойчивость конического перехода обеспечена, если выполняется условие п. 5.5.3.3, где допускаемое давление $[p_a]$ определяют согласно п. 5.5.5, а расчетное осевое напряжение сжатия $\sigma_c$ и допускаемое напряжение сжатия $[\sigma_c]$ — согласно п. 5.5.6.

5.5.8. Расчет на устойчивость в условиях ползучести.

5.5.8.1. Расчет на устойчивость в условиях ползучести заключается в определении допускаемого срока службы при действии на рассчитываемый конструктивный элемент заданных наружного давления и сжимающих нагрузок или в определении допускаемых нагрузок для заданного срока службы оборудования.

При расчетах используется функция установившейся ползучести, имеющая вид

$$e = \frac{\sigma}{E^T} + B\sigma^n t,$$

где $e$ — деформация; $\sigma$ — расчетное напряжение, определяемое в соответствии с пп. 5.5.8.2—5.5.8.5, МПа (кгс/мм$^2$); $B$ — коэффициент ползучести, (1/МПа)$^n \cdot$ с$^{-1}$ [(мм$^2$/кгс)$^n \cdot$ ч$^{-1}$]; $n$ — показатель ползучести; $t$ — время, с (ч).

Значения $B$ и $n$ определяют по кривым ползучести на основе приведенной в настоящем пункте зависимости между $e$ и $\sigma$.

Расчет применим при $\sigma_{kr} < R^T_{p0,2}$.

5.5.8.2. Формулы применимы для расчета гладких длинных цилиндрических элементов, находящихся под действием наруж-

ного давления при удовлетворении следующего условия:

$$0{,}005 \leqslant (s-c)/D_m \leqslant 0{,}2.$$

Расчетный срок службы

$$[t] = \frac{\xi\sigma_{kr}\left[1-2\sigma/(\xi\sigma_{kr})\right]}{3^{\frac{n-1}{2}} nBE^T\sigma^n};$$

$B$, $n$ — см. в п. 5.5.8.1.

Критическое напряжение

$$\sigma_{kr} = 1{,}1E^T\left(\frac{s-c}{D_m}\right)^2.$$

Поправочный коэффициент $\xi$ определяют по формуле п. 5.5.1.8.

Расчетное напряжение

$$\sigma = \frac{pD_m}{2(s-c)}.$$

5.5.8.3. Формулы применимы для расчета полных и усеченных конических оболочек с углом конусности, удовлетворяющих условиям

$$0{,}005 \leqslant \frac{s-c}{D_m} \leqslant 0{,}1; \quad 10 \leqslant \alpha \leqslant 60°.$$

Расчетный срок службы

$$[t] = \frac{\xi\sigma_{kr}\left[1-2\sigma/(\xi\sigma_{kr})\right]}{3^{\frac{n-1}{2}} nBE^T\sigma^n}.$$

Расчетное напряжение

$$\sigma = \frac{pD_m}{2(s-c)\cos\alpha}.$$

Критическое напряжение

$$\sigma_{kr} = \frac{1}{2}C_xE^T\sin\alpha\cos^{1/2}\alpha\left(\frac{s-c}{D_{1m}}\right)^{3/2},$$

где $C_x$ определяют по графику рис. 5.3 в зависимости от $x = D_{0m}/D_m$; $D_{0m}$, $D_m$ — средние диаметры меньшего и большего оснований конической оболочки соответственно, мм.

Поправочный коэффициент $\xi$ определяют по формуле п. 5.5.5.5; $\alpha$ — угол конусности, равный половине угла конуса при вершине, град.

5.5.8.4. Формулы применимы для расчета сферических, эллиптических и торосферических оболочек, удовлетворяющих

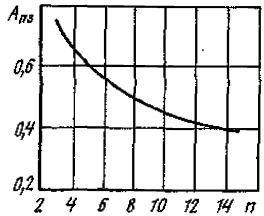



Рис. 5.4. График для определения $A_{n3}$

условию

$$0{,}005 \leqslant (s-c)/D_m \leqslant 0{,}1.$$

Расчетный срок службы

$$[t]=\frac{\xi\sigma_{kr}\left[1-2\sigma/(\xi\sigma_{kr})\right]}{2^{n-1}nBE^T\sigma^n}.$$

Расчетное напряжение

$$\sigma=\frac{pD_m}{4(s-c)}$$ — для сферических оболочек;

$$\sigma=\frac{pb_1^2}{2b_2(s-c)}$$ — для эллиптических и торосферических оболочек.

Критическое напряжение

$$\sigma_{kr}=1{,}2E^T(s-c)/D_m$$ — для сферических оболочек;

$$\sigma_{kr}=0{,}6E^Tb_2(s-c)/b_1^2$$ — для эллиптических и торосферических оболочек;

$b_1$, $b_2$ — большая и малая полуоси эллиптических или торосферической оболочек соответственно, мм.

5.5.8.5. Формулы применимы для расчета гладких цилиндрических оболочек, нагруженных осевым сжатием и удовлетворяющих условию

$$0{,}005 \leqslant (s-c)/D_m \leqslant 0{,}2.$$

Расчетное осевое напряжение

$$\sigma=\frac{F}{\pi D_m(s-c)}.$$

Расчетный срок службы определяют как наименьшее из двух значений:

$$[t]=\frac{(s-c)\left[1-2\sigma/(\xi_1\sigma_{kr1})\right]}{2^nB\sigma^nA_n(n-1)D_m}\ln\frac{1+(B_n/A_n)(2l_0)^{n-1}}{(B_n/A_n)(2l_0)^{n-1}}$$

и

$$[t]=\frac{\xi_2\sigma_{kr2}\left[1-2\sigma/(\xi_2\sigma_{kr2})\right]}{2^{n-1}BE^T\sigma^n},$$

где $\xi_1$ — см. п. 5.5.2.8; $\sigma_{kr1}$ — см. п. 5.5.2.6; $A_n=\sqrt{3n}/2$; $B_n=\frac{(3n)^{n/2}A_{n3}}{(n+1)^{\frac{n+1}{2}}}$; $l_0=\frac{2\cdot10^{-4}D_m}{s-c}$; $B$, $n$ — см. п. 5.5.8.1; $\xi_2$ — см. п. 5.5.2.8;

$\sigma_{kr2}$ — см. п. 5.5.2.7; $A_{n3}$ определяют по графику рис. 5.4 в зависимости от $n$.

5.5.8.6. Устойчивость элементов конструкций будет обеспечена при выполнении условия $t \leqslant [t]$.

## 5.6. РАСЧЕТ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

5.6.1. Метод расчета на циклическую прочность применим до температуры $T_t$ (см. разд. 3.2 Норм) для деталей из сплавов циркония с 1 до 2,5% ниобия, углеродистых и легированных сталей, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, жаропрочных хромомолибденованадиевых сталей и железоникелевых сплавов.

5.6.2. Определение допускаемого числа циклов по заданным амплитудам напряжений или допускаемых амплитуд напряжений для заданного числа циклов проводится:

1) по расчетным кривым усталости, характеризующим в пределах их применения зависимость между допускаемыми амплитудами условных напряжений и допускаемыми числами циклов, или

2) по формулам, связывающим допускаемые амплитуды условных напряжений и допускаемые числа циклов, в случаях уточненного расчета допускаемых числа циклов или амплитуды напряжений или когда расчетные кривые не могут быть применены.

5.6.3. Амплитуда эксплуатационного напряжения не должна превышать допускаемую амплитуду напряжения $[\sigma_{aF}]$, получаемую для заданного числа циклов $N$. Если задана амплитуда напряжения, то эксплуатационное число циклов $N$ не должно превышать допускаемое число циклов $[N_0]$.

Если процесс нагружения состоит из ряда циклов, характеризуемых амплитудами напряжений $(\sigma_{aF})_i$ и соответствующими числами циклов $N_i$, то должно выполняться условие прочности по накопленному усталостному повреждению.

5.6.4. Для углеродистых и легированных сталей в интервале температур от 293 до 623 К (от 20 до 350° С) при значениях $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$; $R^T_m \geqslant 450$ МПа; $Z^T \geqslant 32\%$ и $E^T = 195$ ГПа расчетная кривая усталости приведена на рис. 5.5.

Для сталей аустенитного класса в интервале температур от 293 до 723 К (от 20 до 450° С) при значениях $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$; $R^T_m \geqslant 350$ МПа; $Z^T \geqslant 45\%$ и $E^T = 173$ ГПа расчетная кривая усталости приведена на рис. 5.6.

Для углеродистых и легированных сталей в интервале температур от 293 до 623 К (от 20 до 350° С), значениях $0{,}7 < R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}8$; $R^T_m \geqslant 500$ МПа; $Z^T \geqslant 45\%$ и $E^T = 190$ ГПа расчетные кривые усталости приведены на рис. 5.7, а для сталей в

интервале температур от 293 до 623 К (от 20 до 350° С) при значениях $0{,}8 < R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}9$; $R^T_m \geqslant 500$ МПа; $Z^T \geqslant 45\%$ и $E^T = 190$ ГПа расчетные кривые усталости приведены на рис. 5.8.

Кривые на рис. 5.7 и 5.8 построены для различных значений коэффициента концентрации приведенных напряжений $K_{(\sigma)}$.

Расчетные кривые на рис. 5.5—5.8 получены с учетом максимальных коэффициентов запаса. Эти кривые допускается использовать при коэффициентах асимметрии цикла напряжений $r \leqslant 0$.

5.6.5. Допускаемую амплитуду условного упругого напряжения для заданных температур, ниже приведенных в п. 5.6.4, можно определять умножением значений $[\sigma_{aF}]$ по расчетным кривым рис. 5.5—5.8 на отношение модуля упругости при заданной температуре к модулю упругости при максимальной температуре применения соответствующей расчетной кривой.

5.6.6. Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения или допускаемое число циклов для сталей с отношением $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$ при $[N_0] \leqslant 10^{12}$ определяется по формулам

$$\left.\begin{aligned} [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e^T_c}{n_\sigma (4[N_0])^m} + \frac{R^T_c}{n_\sigma \left[(4[N_0])^{m_\varepsilon} + \dfrac{1+r}{1-r}\right]}; \\ [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e^T_c}{(4n_N[N_0])^m} + \frac{R^T_c}{(4n_N[N_0])^{m_\varepsilon} + \dfrac{1+r}{1-r}}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.20)$$

где $n_\sigma$, $n_N$ — коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов; $m$, $m_\varepsilon$ — характеристики материала; $r$ — коэффициент асимметрии цикла напряжений; $R^T_c$ — характеристика прочности, принимаемая равной

$$R^T_c = R^T_m (1 + 1{,}4 \cdot 10^{-2} Z^T);$$

$e^T_c$ — характеристика пластичности, зависящая от значения $Z^T_c$, определяется по формуле

$$e^T_c = 1{,}15 \lg \frac{100}{100 - Z^T_c} - \frac{(\sigma^*_F)_{max} - R^T_{p0,2}}{2E^T} \qquad (5.21)$$

или при $(\sigma^*_F)_{max} < R^T_{p0,2}$ — по формуле

$$e^T_c = 1{,}15 \lg \frac{100}{100 - Z^T_c}. \qquad (5.22)$$

При использовании данных государственных стандартов, технических условий на материал или данных приложения

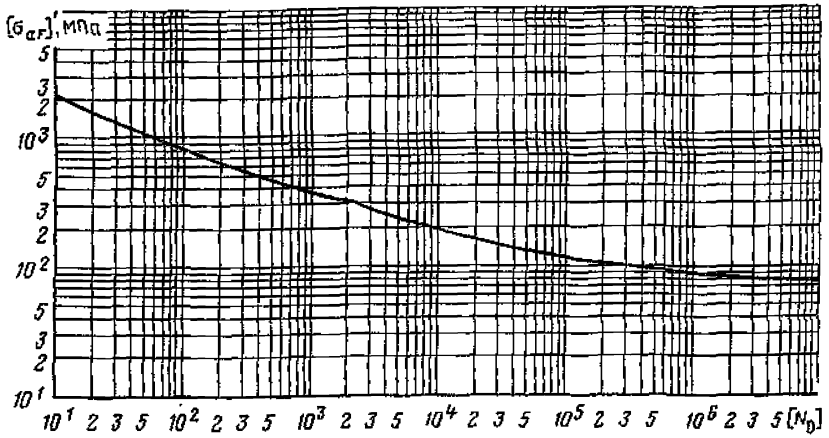



Рис. 5.5. Расчетная кривая усталости углеродистых и легированных сталей с $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$ до $T=623$ К (350° С)

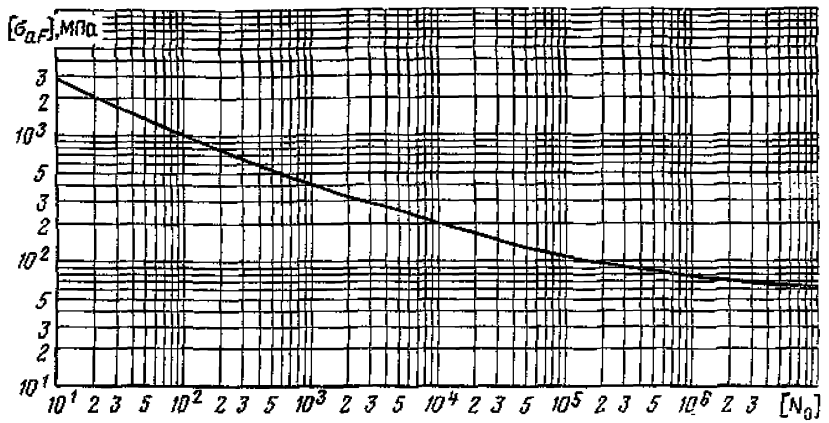



Рис. 5.6. Расчетная кривая усталости сталей аустенитного класса до $T=723$ К (450° С)

1 Норм расчета на прочность, в которых приведены гарантированные механические характеристики, при $Z^T \leqslant 50\%$ следует принимать $Z^T_c = Z^T$. При $Z^T > 50\%$ следует принимать $Z^T_c = 50\%$.

Если характеристика пластичности $e^T_c$ определяется по значению $Z^T$, полученному при испытании на статическое растяжение, то используются формулы

$$e^T_c = 0{,}005 Z^T - \frac{(\sigma^*_F)_{max} - R^T_{p0,2}}{2E^T} \quad \text{при} \quad (\sigma^*_F)_{max} > R^T_{p0,2} \qquad (5.23)$$

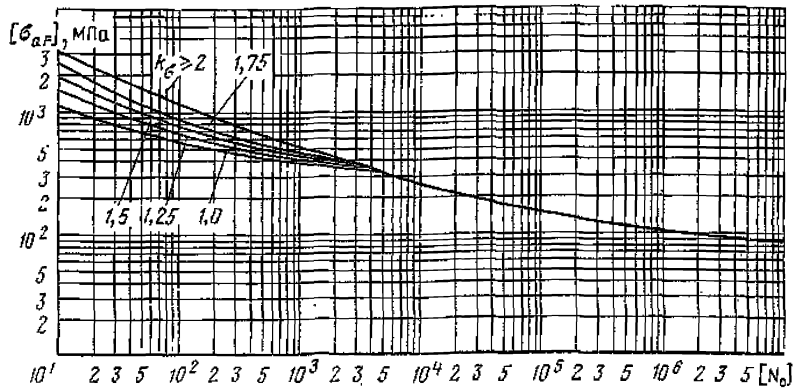



Рис. 5.7. Расчетные кривые усталости углеродистых и легированных сталей с $0,7 < R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0,8$ до $T = 623$ К (350° С)

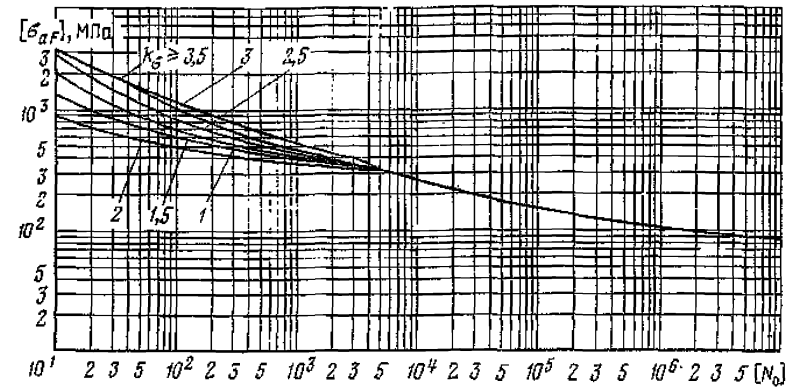



Рис. 5.8. Расчетные кривые усталости углеродистых и легированных сталей с $0,8 < R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0,9$ до $T = 623$ К (350° С)

$$\text{и } e_c^T = 0{,}005 Z^T \text{ при } (\sigma_F^*)_{max} \leqslant R^T_{p0,2}. \qquad (5.24)$$

Характеристики $E^T$, $Z^T$, $R^T_m$ принимаются равными минимальным значениям в интервале рабочих температур с учетом старения. Коэффициент запаса прочности по напряжениям $n_\sigma = 2$, а по числу циклов $n_N = 10$.

При расчете деталей, которые нагружены только тепловыми нагрузками (например, тепловые экраны и подобные детали) или тепловыми и механическими нагрузками при ограничении деформации другими упругими несущими элементами (напри-

мер, антикоррозионная рубашка корпуса) и разрушение которых не приводит к выходу теплоносителя за пределы несущих элементов, коэффициенты запаса прочности по напряжениям $n_\sigma$ и числу циклов $n_N$ принимаются равными 1,5 и 3 соответственно.

При расчете сварных соединений с неполным проплавлением, выполненных аустенитными электродами и примененных в указанных выше деталях, с учетом эффективного коэффициента концентрации по п. 5.3.10 коэффициенты запаса прочности принимаются равными $n_\sigma=1{,}25$ и $n_N=2{,}1$.

Показатели степени $m$ и $m_e$ и предел выносливости $R^T_{-1}$ принимаются по табл. 5.7.

Если допускаемое число циклов $[N_0]\leqslant 10^6$, то определение $[\sigma_{aF}]$ допускается проводить по формулам

$$\left.\begin{aligned}[\sigma_{aF}]&=\frac{E^T e_c^T}{n_\sigma(4[N_0])^m}+\frac{R^T_{-1}}{n_\sigma\left(1+\dfrac{R^T_{-1}}{R^T_m}\dfrac{1+r}{1-r}\right)};\\ [\sigma_{aF}]&=\frac{E^T e_c^T}{(4n_N[N_0])^m}+\frac{R^T_{-1}}{1+\dfrac{R^T_{-1}}{R^T_m}\dfrac{1+r}{1-r}}.\end{aligned}\right\}\qquad(5.25)$$

Из двух значений $[N_0]$ или $[\sigma_{aF}]$, определенных по формулам (5.20) или (5.25), выбирается наименьшее.

5.6.7. Допускаемая амплитуда напряжений или допускаемое число циклов для сталей перлитного класса при значениях $[N_0]\leqslant 10^{12}$ и $R^T_{p0,2}/R^T_m>0{,}7$ определяется по формулам (5.20) или (5.25) и по формуле

$$[\sigma_{aF}]=\frac{B^T E^T e_m^T}{(n_N[N_0])^{m_1}}\frac{1-r}{2}K^2_{(\sigma)}+\frac{R_c^T}{(4n_N[N_0])^{m_e}+\dfrac{1+r}{1-r}},\qquad(5.26)$$

Таблица 5.7. **Значения показателей степени $m$ и $m_e$ и предела выносливости $R^T_{-1}$**

| Обозначение | $R^T_m\leqslant 700$ МПа | $700<R^T_m\leqslant 1200$ МПа |
|---|---|---|
| $R^T_{-1}$ (при симметричном цикле) | $0{,}4R^T_m$ | $(0{,}54-2\cdot10^{-4}R^T_m)\,R^T_m$ |
| $m$ | 0,5 | $0{,}36+2\cdot10^{-4}R^T_m$ |
| $m_e$ | $0{,}132\lg\left[\dfrac{R^T_m}{R^T_{-1}}(1+1{,}4\cdot10^{-2}Z^T)\right]$ | |

где коэффициент запаса прочности по числу циклов $n_N=10$; $B^T$, $m_1$ — характеристики материала. Для сталей при значениях $R^T_{p0.2}/R^T_m \geqslant 0{,}7$ значение $B^T$ определяется по формуле

$$B^T=0{,}16\left(1+\frac{1}{1-R^T_{p0,2}/R^T_m}\right), \tag{5.27}$$

а показатель степени $m_1$ — по формуле

$$m_1=\left(1{,}2\frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}-0{,}35\right)\frac{1-r}{2}; \tag{5.28}$$

$e^T_m$ — характеристика пластичности, характеризуемая значением равномерного относительного сужения $Z^T_m$, определяется по формуле

$$e^T_m=1{,}15\lg\frac{100}{100-Z^T_m}; \tag{5.29}$$

$K_\sigma$ — теоретический коэффициент концентрации приведенных напряжений.

Характеристики механических свойств $E^T$, $Z^T_m$, $R^T_c$ принимаются равными минимальным значениям в рассматриваемом интервале температур с учетом старения.

Для деталей, рассчитываемых по формулам (5.20) или (5.25) с коэффициентами запаса $n_\sigma=1{,}5$ и $n_N=3$, коэффициент запаса прочности по числу циклов при расчете по формуле (5.26) принимается равным 3.

Значение равномерного сужения поперечного сечения (сужение при напряжении, равном пределу прочности) определяется экспериментально в соответствии с методом испытаний на растяжение или по формуле

$$Z^T_m=Z^T\frac{1-R^T_{p0,2}/R^T_m}{1+1{,}4\cdot10^{-2}Z^T-R^T_{p0,2}/R^T_m}. \tag{5.30}$$

Из трех значений $[\sigma_{aF}]$ или $[N_0]$, определяемых в общем случае по формулам (5.20) или (5.25) и (5.26), выбирается наименьшее.

При числе циклов до $[N]=10^6$ для определения допускаемой амплитуды напряжений можно вместо формулы (5.26) использовать формулу

$$[\sigma_{aF}]=\frac{B^TE^Te^T_m}{(n_N[N_0])^{m_1}}\frac{1-r}{2}K^2_{(\sigma)}+\frac{R^T_{-1}}{1+\dfrac{R^T_{-1}}{R^T_m}\dfrac{1+r}{1-r}}.$$

5.6.8. Коэффициент асимметрии цикла напряжений при

$$(\sigma_F)_{\max}<R^{(T_{\min})}_{p0,2} \quad \text{и} \quad 2(\sigma_{aF})<\left[R^{(T_{\min})}_{p0,2}+R^{(T_{\max})}_{p0,2}\right]$$

вычисляется по формуле

$$r=\frac{(\sigma_F)_{max}-2(\sigma_{aF})}{(\sigma_F)_{max}}. \qquad (5.31)$$

Если коэффициент асимметрии цикла $r<-1$ или $r>1$, то в расчете принимается $r=-1$.

При $(\sigma_F)_{max}>R_{p0,2}^{(T_{min})}$ и $2(\sigma_{aF})<[R_{p0,2}^{(T_{min})}+R_{p0,2}^{(T_{max})}]$ коэффициент асимметрии цикла определяется по формуле (5.31), где $(\sigma_F)_{max}$ заменяется максимальным напряжением из упругопластического расчета. Допускается использовать формулу

$$r=\frac{R_{p0,2}^{(T_{min})}-2(\sigma_{aF})}{R_{p0,2}^{(T_{min})}}. \qquad (5.32)$$

При одновременном выполнении условий $(\sigma_F)_{max}<R_{p0,2}^{(T_{min})}$;
$|(\sigma_F)_{max}-2(\sigma_{aF})|>R_{p0,2}^{(T_{min})}$ и $2(\sigma_{aF})<[R_{p0,2}^{(T_{min})}+R_{p0,2}^{(T_{max})}]$
коэффициент асимметрии $r=-1$.

При $2(\sigma_{aF})\geqslant[R_{p0,2}^{(T_{min})}+R_{p0,2}^{(T_{max})}]$ коэффициент асимметрии определяется по формуле

$$r=-R_{p0,2}^{(T_{max})}/R_{p0,2}^{(T_{min})}. \qquad (5.33)$$

Если по формулам (5.31)—(5.33) коэффициент асимметрии цикла $r$ окажется в пределах от $-1$ до $-1{,}2$, то при расчете амплитуды напряжений по формуле (5.26) принимается $r=-1$.

5.6.9. Расчет по формуле (5.26) не проводится, если выполняется одно из следующих условий:

1) коэффициент асимметрии $r<-1{,}2$ или $r>1$;

2) напряжения обусловлены действием только изгибающего момента или тепловыми нагрузками при сжимающих или равных нулю средних по сечению напряжениях.

5.6.10. Остаточное напряжение учитывают в том случае, если оно является растягивающим и в рассматриваемой зоне детали амплитуда местного условного упругого напряжения от механических и тепловых нагрузок ни при одном из типов циклов нагружения не превышает предела текучести при температуре 293 К (20° С). Допускается принимать остаточное напряжение равным пределу текучести при температуре 293 К (20° С). При определении допускаемой амплитуда напряжений по формуле (5.26) остаточное напряжение не учитывается.

5.6.11. Остаточное напряжение учитывается при определении значения коэффициента асимметрии цикла напряжений алгебраическим суммированием его с напряжением от эксплуатационных механических и тепловых нагрузок только в случае расчета по расчетным кривым усталости рис. 5.5—5.8 (на рис. 5.7, 5.8 только по верхним кривым) и по формулам (5.20) и (5.25).

При определении коэффициента асимметрии в расчете нетермообработанных сварных соединений с неполным проплавлением напряжение $(\sigma_F)_{max}$ принимается равным пределу текучести при минимальной температуре цикла.

5.6.12. Допускаемую амплитуду напряжений для сварного соединения $[\sigma_{aF}]_s$, за исключением сварного соединения с неполным проплавлением (п. 5.3.11), определяют по формуле

$$[\sigma_{aF}]_s = \varphi_s [\sigma_{aF}],$$

где $[\sigma_{aF}]$ — амплитуда допускаемых условных упругих напряжений, определяемая по расчетной кривой усталости или соответствующей формуле для основного материала при заданном числе циклов; $\varphi_s$ — коэффициент, зависящий от вида сварки свариваемых материалов и термообработки после сварки ($\varphi_s \leqslant 1$).

Значения $\varphi_s$ для ряда сварных соединений приведены в табл. 5.8. Коэффициент $\varphi_s$ используется совместно с расчетной кривой усталости основного материала, по отношению к которому определен $\varphi_s$.

Для других методов сварки, сварочных и свариваемых материалов, не указанных в табл. 5.8, значение $\varphi_s$ определяют экспериментально.

При отсутствии данных о значении $\varphi_s$ могут быть использованы данные табл. 5.9.

5.6.13. При расчетах корпусов с антикоррозионной наплавкой оценку циклической прочности проводят раздельно для основного металла и металла наплавки по кривым и расчетным формулам настоящего раздела с учетом коэффициента $\varphi_s$.

Коэффициент $\varphi_s$ для наплавки корпуса используется совместно с расчетной кривой усталости основного металла корпуса по п. 5.6.6.

Значение $\varphi_s$ для ручной сварки стали аустенитного класса электродами марок ЭА-395/9 и ЭА-400/10У можно применять при расчете разнородного сварного соединения сталей перлитного класса со сталью аустенитного класса для слоя, наплавленного на сталь перлитного класса, с использованием расчетной кривой усталости стали аустенитного класса.

5.6.14. *Для резьбовых участков шпилек*, болтов из сталей перлитного класса при температурах от 293 до 623 К (от 20 до 350° С) используются расчетные кривые усталости (рис. 5.9, 5.10), полученные с учетом коэффициентов запаса $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 5$.

Расчетные кривые на рис. 5.9 применяются при значениях $650 \leqslant R_m^T < 750$ МПа; $Z^T \geqslant 50\%$ и $E^T = 190$ ГПа.

Расчетные кривые на рис. 5.10 применяются при значениях $R_m^T \geqslant 750$ МПа; $Z^T \geqslant 40\%$ и $E^T = 190$ ГПа.

5.6.15. Уточненный расчет резьбовых участков шпилек, болтов проводится по п. 5.3.8 и формулам (5.20) или (5.25). При

Таблица 5.8. **Коэффициенты снижения циклической прочности сварных соединений**

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | $\varphi_s$ |
|---|---|---|---|---|
| Стали марок 20, 22К, 20К | Ручная | Электроды марок УОНИ-13/45 УОНИ-13/45А | Без термообработки; отпуск; нормализация и отпуск | 1,0 |
| | | Электрод марки УОНИ-13/55 | Без термообработки; отпуск до 10 ч | $\varphi_s=0,8$ при $(\sigma_{(aF)})>400$ МПа; $\varphi_s=1,46-0,26\lg(\sigma_{(aF)})$ при $60<(\sigma_{(aF)})\leqslant 400$ МПа; $\varphi_s=1,0$ при $(\sigma_{(aF)})\leqslant 60$ МПа |
| | | | Отпуск более 15 ч | 1,0 |
| | Автоматическая под флюсом | Сварочная проволока марки Св-08А Св-08ГСМТ ЭП-458 | Без термообработки | 0,9 |
| | | | Отпуск | 1,0 |
| | Электрошлаковая | Сварочная проволока марки Св-10Г2 Св-08ГСМТ | Нормализация и отпуск; закалка и отпуск | 1,0 |
| Стали марок 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А | Ручная | Электроды марок Н-3, Н-6, Н-10 | Отпуск | 1,0 |
| | Автоматическая под флюсом | Сварочная проволока марки Св-10ХМФТ; Св-10ХМФТУ | » | $\varphi_s=0,7$ при $(\sigma_{(aF)})>500$ МПа; $\varphi_s=1,34-0,24\lg(\sigma_{(aF)})$ при $70<(\sigma_{(aF)})\leqslant 500$ МПа; $\varphi_s=0,9$ при $(\sigma_{(aF)})\leqslant 70$ МПа |
| | Электрошлаковая | Сварочная проволока марки Св-13Х2МФТ | Закалка и отпуск | 0,8 |
| | Автоматическая наплавка ленточным электродом под флюсом | Электроды марок Св-07Х25Н13, Св-08Х19Н10Г2Б | Отпуск | 0,8 |

*Продолжение табл. 5.8*

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | $\varphi_s$ |
|---|---|---|---|---|
| | Ручная наплавка электродами | Электроды марок ЭИО-8, ЭА-898/21Б | Отпуск | 0,8 |
| Стали марок 15Х2НМФА, 15Х3НМФА, 15Х2НМФА-А, 15Х3НМФА-А | Ручная | Электрод марки Н-23 | » | 1,0 |
| | Автоматическая под флюсом | Сварочная проволока марки Св-09ХГНМТА | » | 1,0 |
| | Электрошлаковая | Сварочная проволока марки Св-16Х2НМФТА | Закалка и отпуск | 1,0 |
| Стали аустенитного класса | Ручная | Электрод марки ЭА-395/9 | Без термообработки | 1,0 |
| | | Электроды марок ЭА-400-10У, ЭА-898/21Б, ЭИО-8 | Отпуск | 0,8 |
| | Аргонодуговая | Сварочная проволока марки Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки, отпуск | 1,0 |

Таблица 5.9. **Значения коэффициента снижения циклической прочности для сварного соединения**

| Основной материал (сталь) | $\varphi_s$ для сварного соединения | |
|---|---|---|
| | после отпуска | без отпуска |
| Углеродистая, кремнемарганцовистая, легированная, $R_m^T \leqslant 380$ МПа | 0,75 | 0,75 |
| Легированная, $380 < R_m^T \leqslant 520$ МПа | 0,70 | 0,65 |
| Легированная, $520 < R_m^T \leqslant 700$ МПа | 0,60 | 0,50 |
| Аустенитная | 0,70 | 0,60 |

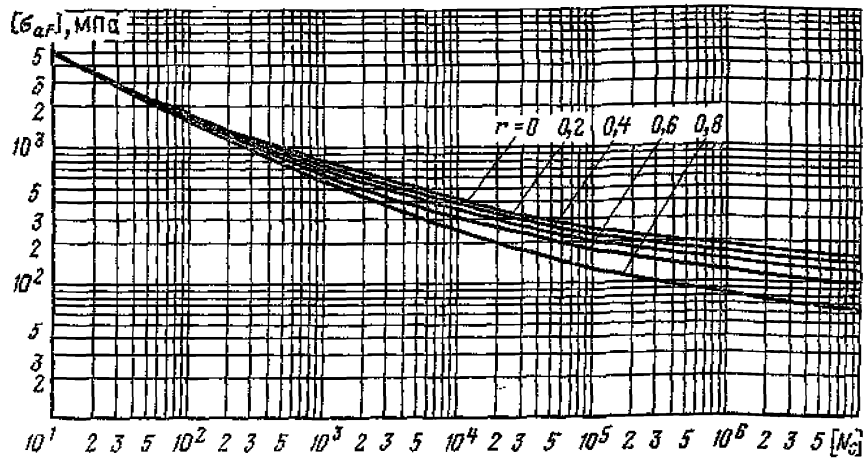



Рис. 5.9. Расчетные кривые усталости для резьбовых участков шпилек и болтов из сталей перлитного класса с $650 \leqslant R_m^T < 750$ МПа до $T = 623$ К (350° С) при различных значениях коэффициента асимметрии $r$

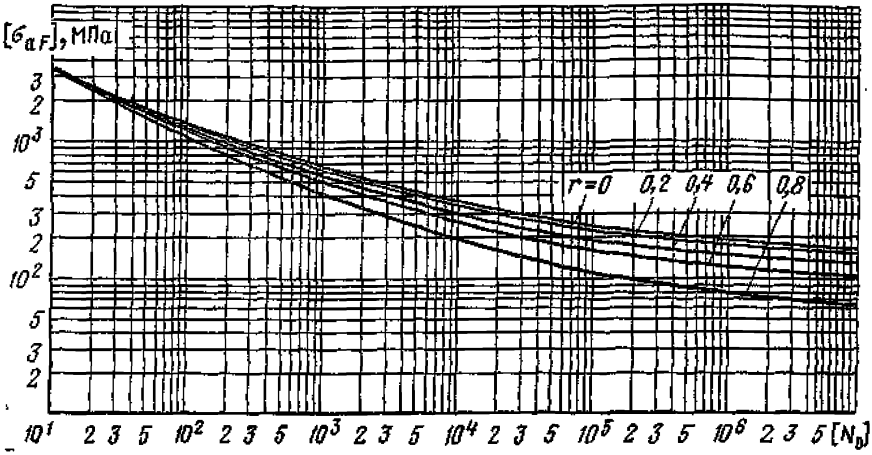



Рис. 5.10. Расчетные кривые усталости для резьбовых участков шпилек и болтов из сталей перлитного класса с $R_m^T \geqslant 750$ МПа до $T = 623$ К (350° С) при различных значениях коэффициента асимметрии $r$

этом коэффициенты запаса $n_\sigma$ и $n_N$ принимаются равными 1,5 и 3 соответственно. При использовании коэффициентов концентрации $K_{\sigma f}$ коэффициенты запаса $n_\sigma$ и $n_N$ принимаются равными 1,5 и 5 соответственно.

Коэффициент асимметрии цикла местных напряжений определяется по формулам (5.31)—(5.33).

5.6.16. В тех случаях, когда низкочастотные циклические напряжения, связанные с пуском, остановкой, изменением

мощности, срабатыванием аварийной защиты или другими режимами, сопровождаются наложением высокочастотных напряжений, например вызванных вибрацией, пульсацией температур при перемешивании потоков теплоносителя с различной температурой, расчет на циклическую прочность проводится с учетом высокочастотного нагружения.

5.6.17. Исходные данные о высокочастотном нагружении получаются при анализе результатов измерений при эксплуатации элемента конструкции или их расчетом.

5.6.18. В расчете допускаемого числа циклов при высокочастотном нагружении используются только кривые усталости, полученные по формулам (5.20), (5.25), для сталей с отношением как $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$, так и $R^T_{p0,2}/R^T_m > 0{,}7$.

5.6.19. Условие прочности при наличии различных циклических нагрузок проверяется по формуле

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{[N_0]_i} = a \leqslant [a_N], \tag{5.34}$$

где $N_i$ — число циклов $i$-го типа за время эксплуатации; $k$ — общее число типов циклов; $[N_0]_i$ — допускаемое число циклов $i$-го типа; $a$ — накопленное усталостное повреждение, предельное значение которого $[a_N]=1$.

В общем случае

$$a = \max \left\{ \begin{matrix} a_1 + a_2 + a_3 \\ a_2^* \end{matrix} \right\} \leqslant [a_N], \tag{5.35}$$

где $a_1$ — повреждение от эксплуатационных циклов нагружения, на которые не наложены высокочастотные напряжения; $a_2$ — повреждения от высокочастотных напряжений при постоянных эксплуатационных напряжениях (стационарные режимы); $a_2^*$ — повреждение типа $a_2$, определяемое для условий нагружения при стационарном режиме, приводящем к наибольшему повреждению за все время эксплуатации; $a_3$ — сумма повреждений от высокочастотных напряжений в течение циклов переменных напряжений на переходных эксплуатационных режимах $a_3^*$ и при прохождении резонансных частот $a_3^{**}$ в тех же циклах.

Накопленные повреждения $a_1$ и $a_2$ определяются по формуле (5.34). Значения амплитуд и частот при определении повреждений $a_2$ и $a_3$ принимают в соответствии с разд. 6.3 приложения 8.

5.6.20. Сочетание основного циклического нагружения с амплитудой $(\sigma_{aF})$ и частотой $f_0$ и наложенного с амплитудой $\langle \sigma_a \rangle$ и частотой $f$ вызывает снижение допускаемого числа циклов основного низкочастотного нагружения от $[N_0]$ до $[N]$, определяемого по формуле

$$[N] = [N_0]/\varkappa, \tag{5.36}$$

где $\varkappa$ — коэффициент снижения долговечности при наложении высокочастотных циклов, используемых при определении повреждения $a_3^*$.

Для основного цикла нагружения $i$-го типа повреждение $a_3^*$ определяют по формуле

$$(a_3^*)_i = \varkappa_i N_i / [N_0]_i. \qquad (5.37)$$

Коэффициент $\varkappa$ независимо от степени концентрации напряжений, остаточных напряжений, асимметрии цикла, значения номинальных напряжений и температуры определяют по номограммам, приведенным на рис. 5.11 и 5.12, или вычисляют по формуле

$$\varkappa = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\eta \frac{\langle \sigma_a \rangle}{(\sigma_a)}}, \qquad (5.38)$$

где $f_0 = 1/(t_1 + t_2)$ — частота основного цикла переменных напряжений, определяемая без учета периода времени, в течение которого происходит наложение дополнительных напряжений на постоянные (рис. 5.13); $(\sigma_a)$ — амплитуда приведенных напряжений основного цикла без учета концентрации напряжений; $\eta$ — коэффициент, зависящий от материала, принимаемый по табл. 5.10.

При отсутствии экспериментальных данных для предварительных оценок значение $\eta$ принимается равным 2.

5.6.21. Метод расчета при двухчастотном циклическом нагружении применим при выполнении всех следующих условий:

1) отношение амплитуды напряжений $\langle \sigma_a \rangle$ к амплитуде напряжений $(\sigma_a)$ находится в интервале

$$0 < \langle \sigma_a \rangle / (\sigma_a) \leqslant 0{,}5; \qquad (5.39)$$

2) абсолютное значение максимального и минимального напряжений при двухчастотном нагружении не превышает значения $(0{,}2 \cdot 10^{-2} E^T + R^T_{p0,2})$ при расчетной температуре;

3) отношение $f/f_0$ не превышает $5 \cdot 10^6$;

4) число циклов с амплитудой $\langle \sigma_a \rangle$ в пределах времени $t_1 + t_2$ превышает 10 (рис. 5.13).

5.6.22. При расчетах циклической прочности деталей, подвергаемых облучению, учитывается снижение относительного

Таблица 5.10. **Значения коэффициента $\eta$**

| Вид материала | Углеродистая сталь, $R_m^T \leqslant$ $\leqslant 500$ МПа | Аустенитная сталь, $R_m^T \leqslant$ $\leqslant 550$ МПа | Легированная сталь, $500 < R_m^T \leqslant 800$ МПа | Легированная сталь, $R_m^T >$ $> 800$ МПа |
|---|---|---|---|---|
| $\eta$ | 1,3 | 1,54 | 1,8 | 1,9 |

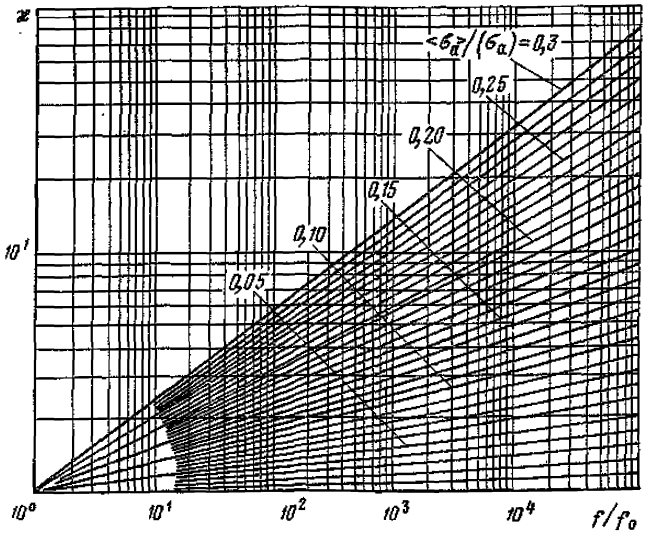



Рис. 5.11. Значения x для сталей перлитного класса и их сварных соединений с $R_m^T \leqslant 500$ МПа

сужения. Повышение временного сопротивления под действием облучения не учитывается. Допускается применять коэффициенты снижения циклической прочности под действием облучения, приведенные в приложении 7.

5.6.23. Если при расчете циклической прочности элемента конструкции не обеспечиваются требуемые коэффициенты запаса прочности, то оценка циклической прочности проводится на основе экспериментальных кривых усталости, полученных в соответствии с методом испытаний на усталость (приложение 2) для рассматриваемых условий нагружения и состояния металла конструкции с учетом соответствующих коэффициентов запаса прочности $n_\sigma$ и $n_N$ или по результатам испытаний натурных элементов или их моделей, спроектированных и изготовленных в соответствии с требованиями, предъявляемыми к штатным конструкциям.

Геометрическое подобие моделей должно быть обеспечено по крайней мере в зоне проверки циклической прочности и примыкающих к ней участков, оказывающих влияние на значение и распределение напряжений в испытуемой зоне. Моделирование сварного соединения с уменьшением натурных размеров элементов и антикоррозионной наплавки с изменением ее толщины не рекомендуется, если целью испытания является проверка их прочности.

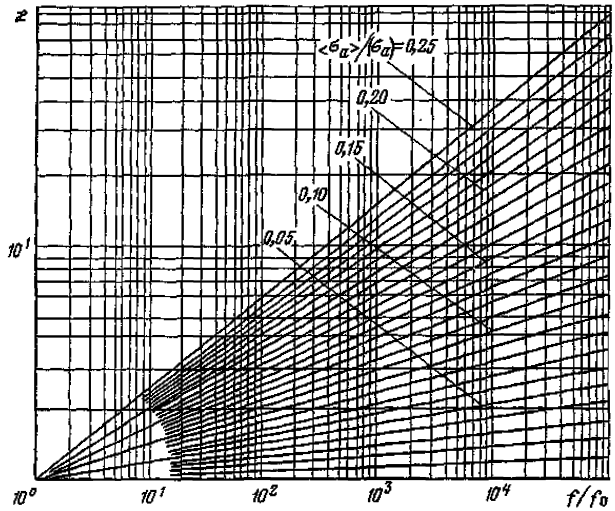



Рис. 5.12. Значения $\varkappa$ для сталей аустенитного класса и их сварных соединений с $R_m^T \leqslant 550$ МПа

Режим испытаний по характеру изменения нагрузок и температур должен соответствовать условиям эксплуатации.

Коэффициенты запаса прочности принимаются по значению приведенного местного условного упругого напряжения в зоне, определяющей долговечность, или по числу циклов нагружения, или по напряжению и числу циклов одновременно.

Запасы прочности по условному напряжению и числу циклов $N \leqslant 10^4$ определяются по формулам

$$n_\sigma = 1{,}45 - 0{,}02x; \tag{5.40}$$

$$n_N = 3{,}5 - 0{,}14x, \tag{5.41}$$

где $x$ — число испытанных объектов.

При этом запасы $n_\sigma$ и $n_N$ по моменту образования трещин при циклическом нагружении натурных элементов конструкций или их моделей должны быть не ниже 1,25 и 2,1 соответственно.

Условия мало- и многоцикловых испытаний по напряжению и числу циклов при одновременном применении коэффициентов запаса $n_\sigma$ и $n_N$ определяются с использованием расчетной кривой усталости для основного металла или сварного соединения при соответствующих асимметрии цикла нагружения и температуре. Для этого определяют наклон $m_0$ расчетной кривой усталости в точке с $[N_0] = N_e$, где $N_e$ — заданное в

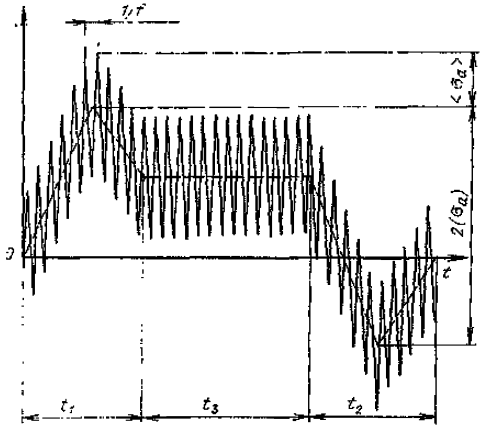



Рис. 5.13. Форма цикла при двухчастотном нагружении

эксплуатации число циклов. Отрезок, соединяющий точки с координатами $\{N_e,\ n_\sigma(\sigma_{aF})\}$ и $\{(n_\sigma)^{1/m_0}N_e,\ (\sigma_{aF})\}$, является сочетанием эквивалентных режимов испытаний.

При испытании геометрически подобных моделей коэффициент запаса прочности по приведенному местному условному упругому напряжению определяется по формуле

$$n_{\sigma M}=n_\sigma\left(1{,}5-0{,}5\frac{l_м}{l_к}\right), \tag{5.42}$$

где $l_м$, $l_к$ — линейные размеры модели и натурной конструкции в испытываемой зоне.

Коэффициент запаса по числу циклов при испытании модели

$$n_{NM}=(n_{\sigma M})^{1/m_0}. \tag{5.43}$$

Результаты испытаний на циклическую прочность не могут служить основанием для повышения допускаемых значений категорий напряжений, используемых при расчете на статическую прочность.

5.6.24. В приложении 12 (рекомендуемом) приведен упрощенный метод расчета на циклическую прочность, который может применяться взамен метода по разд. 5.3 и 5.6.

## 5.7. РАСЧЕТ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

5.7.1. Расчет на длительную циклическую прочность проводят применительно к элементам конструкций, работающим при

температурах, вызывающих ползучесть, и нагружаемым повторными тепловыми или механическими усилиями.

5.7.2. Рекомендуемый метод расчета на длительную циклическую прочность приведен в приложении 7.

В расчете используются характеристики длительной прочности и пластичности по табл. П6.1 и П6.3.

5.7.3. Элемент конструкции, рассчитываемый на длительную циклическую прочность, должен удовлетворять:

1) условиям прочности, принимаемым при выборе основных размеров во всем интервале эксплуатационных температур;

2) условиям прочности при расчете на длительную статическую прочность.

5.7.4. Допускается применение других методов при условии их надлежащего расчетно-экспериментального обоснования для используемых материалов, условий эксплуатации и эксплуатационного ресурса по числу циклов и длительности нагружения.

## 5.8. РАСЧЕТ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

5.8.1. Общие положения.

5.8.1.1. На основе положений настоящего раздела производят расчет на сопротивление хрупкому разрушению оборудования и трубопроводов АЭУ на стадии проектирования.

5.8.1.2. Положения настоящего раздела не распространяются на расчет крепежных деталей.

5.8.1.3. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению элементов оборудования и трубопроводов проводят для всех режимов эксплуатации, включая нормальные условия эксплуатации (НУЭ), нарушение нормальных условий эксплуатации (ННУЭ), аварийные ситуации (АС), гидравлические (пневматические) испытания.

5.8.1.4. Основными характеристиками материала, используемыми в расчете, являются критический коэффициент интенсивности напряжений $K_{Ic}$, критическая температура хрупкости $T_k$ и предел текучести $R^T_{p0,2}$.

Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации учитывают введением в расчет сдвигов критической температуры хрупкости вследствие различных воздействий в процессе эксплуатации.

5.8.1.5. Если толщина стенок рассчитываемых элементов меньше, чем требуемые толщины для определения значений $K_{Ic}$ в соответствии с положениями ГОСТ 25.506-85, допускается при расчетах на сопротивление хрупкому разрушению использовать критическое раскрытие трещины $\delta_c$ или другие характеристики ($K_c$, $J_c$), определяемые в соответствии с упомянутым ГОСТ.

Методики расчета с использованием указанных характеристик должны быть согласованы с головной организацией по разработке норм расчета на прочность.

5.8.1.6. *Сопротивление хрупкому разрушению считают обеспеченным, если для выбранного расчетного дефекта в виде трещины в рассматриваемом режиме эксплуатации выполняется условие*

$$K_I \leqslant [K_I]_i,$$

где $[K_I]_i$ — допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений.

Индекс $i$ указывает, что допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений выбирают различными в зависимости от расчетных условий:

$i=1$ — для нормальных условий эксплуатации; $i=2$ — для гидравлических (пневматических) испытаний и нарушения нормальных условий эксплуатации; $i=3$ — для аварийной ситуации.

5.8.1.7. При определении $[K_I]_i$ значения переноса нейтронов $F_n$ и температуры $T$ принимают равными их значениям в точке, соответствующей наибольшей глубине выбранной расчетной трещины.

5.8.1.8. При необходимости проведения расчетов оборудования и трубопроводов, находящихся в эксплуатации, изготовлении или монтаже, или законченных рабочим проектированием на момент введения в действие настоящих норм допускается:

1) использовать положения настоящего расчета;

2) для оборудования и трубопроводов, находящихся в эксплуатации, по согласованию между конструкторской (проектной) организацией, головной материаловедческой организацией, предприятием-владельцем оборудования и трубопроводов определить параметры дефектов, допускаемых по условиям обеспечения прочности, и путем контроля подтвердить отсутствие в оборудовании и трубопроводах дефектов, параметры которых превышают допускаемые по расчету; в расчете следует использовать фактические свойства материалов, а сам расчет (включая схематизацию дефектов, выявленных в процессе контроля) должен выполняться по методикам, согласованным с головной организацией по разработке норм расчета на прочность;

3) для оборудования и трубопроводов, находящихся в изготовлении, монтаже или законченных рабочим проектированием, допускается использовать методики, отличающиеся от описанной в настоящем разделе, по согласованию с головной организацией по разработке норм расчета на прочность и Госатомэнергонадзором СССР.

5.8.1.9. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению допускается не производить для элементов конструкций, не подвергающихся нейтронному облучению (или подвергающихся

облучению при температурах 250—350 °С до переноса не более $10^{22}$ нейтр./м$^2$ при $E \geqslant 0{,}5$ МэВ), в следующих случаях:

1) элементы конструкции изготовлены из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса или цветных сплавов;

2) материалы элементов конструкций (включая сварные соединения) имеют предел текучести при температуре 20 °С менее 300 МПа (30 кгс/мм$^2$), а толщина стенки элемента конструкции составляет не более 25 мм;

3) материалы элементов конструкций (включая сварные соединения) имеют предел текучести при температуре 20 °С менее 600 МПа (60 кгс/мм$^2$), а толщина стенки элемента конструкции составляет не более 16 мм;

4) толщина стенки рассматриваемого элемента конструкции $s$, мм, удовлетворяет условию

$$s \leqslant 8 \cdot 10^3 \left( \frac{[K_I]_1}{R^T_{p\,0,2}} \right)^2$$

при $[K_I]_1$ в МПа·м$^{1/2}$ и $R^T_{p\,0,2}$ в МПа (обе характеристики принимают при наименьшей температуре эксплуатации и критической температуре хрупкости $T_k$, соответствующей концу эксплуатации).

5.8.1.10. В расчетную толщину стенки элементов оборудования и трубопроводов не включается толщина антикоррозионного покрытия.

5.8.2. Коэффициент интенсивности напряжений.

5.8.2.1. Коэффициент интенсивности напряжений для выбранных расчетных трещин определяют аналитически, численно или экспериментально по методикам, согласованным с головной организацией по разработке норм расчета на прочность.

5.8.2.2. Коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$, для цилиндрических, сферических, конических, эллиптических, плоских элементов, нагружаемых внутренним давлением и температурными воздействиями, допускается определять по формуле

$$K_I = \eta(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q)\left(\pi \frac{a}{10^3}\right)^{1/2} / Q,$$

где $\eta$ — коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений; $\sigma_p$ — составляющая напряжений растяжения, МПа; $\sigma_q$ — составляющая изгибных напряжений, МПа; $M_p = 1 + 0{,}12(1 - a/c)$; $M_q = 1 - 0{,}64a/h$; $a$ — глубина трещины, мм; $c$ — полудлина трещины, мм; $h$ — длина зоны, в пределах которой составляющая изгибных напряжений сохраняет положительное значение, мм;

$$Q = [1 + 4{,}6(a/2c)^{1{,}65}]^{1/2}.$$

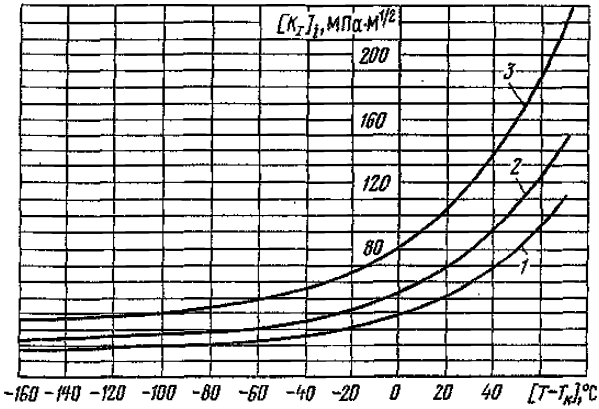



Рис. 5.14. Стали марок 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А: *1*—НУЭ, $[K_I]_1 = 17{,}5 + 22{,}5e^{0{,}02(T-T_K)}$; *2*—ННУЭ и гидравлические (пневматические) испытания, $[K_I]_2 = 23{,}5 + 30e^{0{,}02(T-T_K)}$; *3*—АС, $[K_I]_3 = 35 + 45e^{0{,}02(T-T_K)}$

Формула справедлива при $a \leqslant 0{,}25s$ и $a/c \leqslant 2/3$, где $s$—толщина стенки изделия.

При расчете зон, где отсутствует концентрация напряжений, принимают $\eta = 1$.

5.8.2.3. Составляющую напряжений растяжения (кольцевых или осевых) определяют по формуле

$$\sigma_{jp} = \frac{1}{s}\int_s \sigma_j dx,$$

где $j$—координата $\theta$ или $Z$; $\sigma_j$—функция изменения напряжений по толщине стенки; $s$—толщина стенки в расчетном сечении.

5.8.2.4. Значение составляющей напряжений изгиба определяют по формуле

$$\sigma_{jq} = \sigma_{jn} - \sigma_{jp},$$

где $\sigma_{jn}$—значение функции изменения напряжений по толщине стенки в точке $n$.

Для элементов без антикоррозионной наплавки точку $n$ располагают на наружной или внутренней поверхности изделия в зоне действия максимальных растягивающих напряжений Для элементов с антикоррозионной наплавкой точку $n$ выбирают на наружной поверхности изделия или на поверхности раздела антикоррозионного покрытия и основного металла в зоне действия растягивающих напряжений.

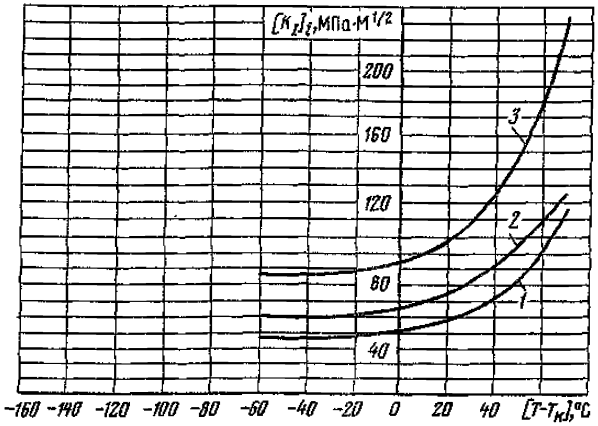



Рис. 5.15. Стали марок 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А:

*1* — НУЭ, $[K_I]_1 = 37 + 5{,}5e^{3{,}85 \cdot 10^{-2}(T-T_k)}$; *2* — ННУЭ и гидравлические (пневматические) испытания, $[K_I]_2 = 50 + 5{,}1e^{4{,}1 \cdot 10^{-2}(T-T_k)}$; *3* — АС, $[K]_3 = 74 + 11e^{3{,}85 \cdot 10^{-2}(T-T_k)}$

5.8.3. Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений.

5.8.3.1. Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений зависят от приведенной температуры $(T-T_k)$ и расчетного случая. Зависимость $[K_I]_i$ от $[T-T_k]$ получают как огибающую двух кривых, определяемых по исходной температурной зависимости $K_{Ic}$. Одну из этих кривых получают делением ординат исходной кривой на коэффициент запаса прочности $n_k$, другую — смещением исходной кривой вдоль оси абсцисс на значение температурного запаса $\Delta T$.

Принимают:

для нормальных условий эксплуатации $(i=1)$ $n_k=2$, $\Delta T=30°$ С;

при нарушении нормальных условий эксплуатации и гидравлических (пневматических) испытаниях $(i=2)$ $n_k=1{,}5$, $\Delta T=30°$ С;

для аварийных ситуаций $(i=3)$ $n_k=1$, $\Delta T=0°$ С.

5.8.3.2. Исходные температурные зависимости $K_{Ic}$ принимают по данным, приведенным в соответствующих аттестационных отчетах по материалам (основной металл, сварные соединения), или по техническим решениям, согласованным с Госатомэнергонадзором СССР, головной материаловедческой организацией и головной организацией по разработке норм расчета на прочность.

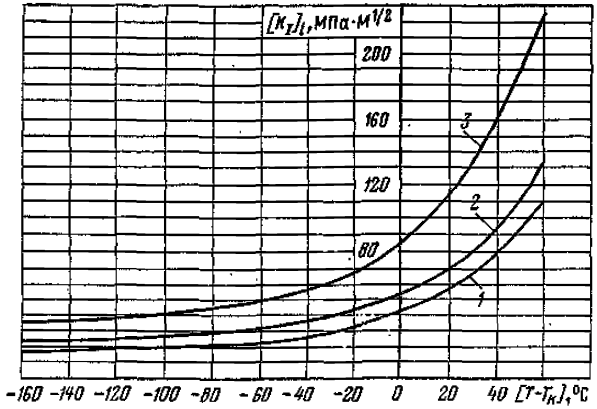



Рис. 5.16. Сварные соединения сталей марок 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А:
*1* — НУЭ, $[K_I]_1 = 17{,}5 + 26{,}5e^{0{,}0217(T-T_k)}$; *2* — ННУЭ и гидравлические (пневматические) испытания, $[K_I]_2 = 25 + 27e^{2{,}35 \cdot 10^{-2}(T-T_k)}$; *3* — АС, $[K_I]_3 = 35 + 53e^{0{,}0217(T-T_k)}$

5.8.3.3. Температурные зависимости $[K_I]_i$ для сталей марок 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А и их сварных соединений приведены на рис. 5.14—5.16.

5.8.3.4. Для сталей перлитного класса и высокохромистых сталей и их сварных соединений с пределом текучести при температуре 20° С, устанавливаемым по указаниям п. 3.7 настоящих Норм и не превышающим 600 МПа (60 кгс/мм$^2$), можно использовать обобщенные кривые допускаемых коэффициентов интенсивности напряжений, приведенные на рис. 5.17.

5.8.4. Критическая температура хрупкости.

5.8.4.1. Критическую температуру хрупкости материала определяют по формуле

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F,$$

где $T_{k0}$ — критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии; $\Delta T_T$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения; $\Delta T_N$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие циклической повреждаемости; $\Delta T_F$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения.

5.8.4.2. Значения $T_{k0}$, $\Delta T_N$, $\Delta T_T$, $\Delta T_F$ (или коэффициента радиационного охрупчивания $A_F$) принимают по данным соответствующих аттестационных отчетов по материалам (основной металл и сварные соединения), данным технических

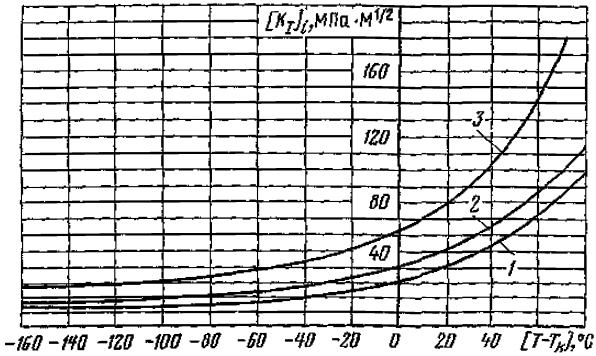



Рис. 5.17. Обобщенные зависимости допускаемых коэффициентов интенсивности напряжений:
*1* — НУЭ, $[K_I]_1 = 13 + 18e^{0,02(T-T_k)}$; *2* — ННУЭ и гидравлические (пневматические) испытания, $[K_I]_2 = 17 + 24e^{0,018(T-T_k)}$; *3* — АС, $[K_I]_3 = 26 + 36e^{0,02(T-T_k)}$

условий на материалы или на основе технических решений, согласованных с Госатомэнергонадзором СССР, головной материаловедческой организацией и головной организацией по разработке норм расчета на прочность.

Методики определения значений $T_{k0}$, $\Delta T_T$, $\Delta T_N$, $\Delta T_F$ (или $A_F$) приведены в приложении 2.

5.8.4.3. Допускается использовать значения $T_{k0}$, $\Delta T_T$, $A_F$, приведенные в табл. 5.11.

5.8.4.4. Допускается определять значения $\Delta T_N$ по формуле

$$\Delta T_N = 20 \sum_{i=1}^{i=m} N_i / [N_i],$$

где $N_i$ — число циклов нагружения при $i$-м режиме эксплуатации; $[N_i]$ — допускаемое число циклов для $i$-го режима эксплуатации; $m$ — число режимов.

5.8.4.5. Допускается определять значения $\Delta T_F$ по формуле

$$\Delta T_F = A_F (F_n / F_0)^{1/3},$$

где $A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С; $F_n$ — перенос нейтронов с $E \geqslant 0{,}5$ МэВ, нейтр./м$^2$; $F_0 = 10^{22}$ нейтр./м$^2$

Формула справедлива при

$$10^{22} \leqslant F_n \leqslant 3 \cdot 10^{24} \text{ нейтр./м}^2.$$

Значения $A_F$ принимают по данным документации по п. 5.8.4.2 или табл. 5.11.

5.8.4.6. При расчете элементов конструкций, изготовленных из сталей марок 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, и их сварных соединений, подвер-

Таблица 5.11. **Значения характеристик сопротивления разрушению**

| Марка основного материала | Вид сварки, марка сварного материала | Стандарт или технические условия | $T_{к0}$, °С | $\Delta T_\gamma$, °С, (см. прим. 1) | Температура облучения, °С | $A_F$, °С (см. прим. 2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15Х2МФА | — | ТУ 5.961-11060-77, Изв. 6-90-3315 | 0 | 0 | 250<br>270<br>290 | 22<br>18<br>14 |
| 15Х2МФА-А | — | ТУ 108.131-75, Изв. 479 | 0 | 0 | 270<br>290 | 12<br>9 |
| 15Х2НМФА | — | ТУ 108.765-78, Изв. 4-83 | 0 | 0 | 290±15 | 29 |
| 15Х2НМФА-А | — | ТУ 108.765-78, Изв. 4-83 | −25 | 0 | 290±15 | 23 |
| 15Х3НМФА | — | ТУ 24-3-15-223-75, Изв. 480, ТУ 5.961-11021-79, Изв. 6-90-3305 | −10 | 0 | — | — |
| 10ХН1М | — | ТУ 14-1-2587-78 | 10 | 10 | — | — |
| 22К | — | ТУ 108-11-543-80 | 40 | 30 | — | — |
| 10ГН2МФА | — | ТУ 108.766-78 | 15 | 10 | — | — |
| 15Х2НМФА | ЭШС, проволока Св-16Х2НМФТА | ТУ 14-1-3633-83 | 20 | 0 | — | — |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Флюс ОФ-6 | — | | | | |
| | РДС, электроды РТ-45А, РТ-45АА, РТ-45Б | ОСТ 108.948.01-80 | 0 | 0 | — | — |
| 15Х2НМФА-А | АДС, проволока Св-12Х2Н2МАА (*в том числе ВИ, ВД*) | ТУ 14-1-2502-78 | 0 | 0 | 290±15 | 20 |
| | Флюс ФЦ-16А | ТУ 108.949-80 | | | | |
| | Проволока Св-09ХГНМТА-ВИ | ТУ 14-1-3675-83 | 0 | 0 | 290±15 | 20 |
| | Флюс КФ-30 | ТУ 5.965-11090-80 | | | | |
| | РДС, электроды РТ-45АА, РТ 45Б | ОСТ 108.948.01-80 | 0 | 0 | 290±15 | 20 |
| 15Х3НМФА-А | АДС, проволока Св-09ХГНМТА-ВИ | ТУ 14-1-3675-83 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюс КФ-30 | ТУ 5.965-11090-80 | | | | |
| | РДС, электроды РТ-45Б | — | 0 | 0 | — | — |

*Продолжение табл. 5.11*

| Марка основного материала | Вид сварки, марка сварного материала | Стандарт или технические условия | $T_{к0}$, °С | $\Delta T_T$, °С (см. прим. 1) | Температура облучения, °С | $A_F$, °С (см. прим. 2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ЭШС, проволока Св-16Х2НМФТА | ТУ 14-1-3633-83 | 20 | 0 | — | — |
| | Флюс ОФ-6 | — | | | | |
| 15Х2МФА | АДС (см. прим. 3), проволока Св-10ХМФТ, Св-10ХМФТУ | ГОСТ 2246-70 | 40 | 0 | 250<br>270 | См. прим. 2 |
| | Флюсы АН-42, АН-42М | — | | | | |
| | КФ-30 | ТУ 5.965-1190-80 | | | | |
| 15Х2МФА | ЭШС (см. прим. 3), проволока Св-13Х2МФТ | ГОСТ 2246-70 | 40 | 0 | — | — |
| | Флюс ОФ-6 | — | | | | |
| | РДС (см.прим. 2), электроды Н-3, Н-6 | ТУ 5.965-4052-73 | 20 | 0 | — | — |
| 15Х2МФА-А | АДС (см. прим. 3), Св-10ХМФТУ | ТУ 14-1-3034-80 | 20 | 0 | 270 | 15 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Флюс КФ-30, АН-42М | ТУ 5.965-11090-80 | | | 290 | 12 |
| | РДС (см. прим. 2), электроды Н-3, Н-6 | ТУ 5.965-4052-73 | 20 | 0 | 270<br>290 | 15<br>12 |
| 15Х2НМФА | АДС (см. прим. 3), проволока Св-12Х2НМФА, Св-12Х2НМФА-А (в том числе ВИ, ВД) | ТУ 14-1-2502-78 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюс ФЦ-16, ФЦ-16А | ТУ 108.949-80 | 0 | 0 | — | — |
| | Проволока Св-09ХГНМТА | ТУ 14-1-3675-83 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюс КФ-30 | ТУ 5.965-11090-80 | | | | |
| 15Х3НМФА-А | АДС, проволока Св-09ХГНМТА-ВИ | ТУ 14-1-3675-83 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюс КФ-30 | ТУ 5.965-11090-78 | | | | |
| | РДС, электроды РТ-45Б | — | 0 | 0 | — | — |
| | ЭШС, проволока Св-16Х2НМФТА | ТУ 14-130-168-75 | 20 | 0 | — | — |

*Продолжение табл. 5.11*

| Марка основного материала | Вид сварки, марка сварного материала | Стандарт или технические условия | $T_{к0}$, °С | $\Delta T_T$, °С (см. прим. 1) | Температура облучения, °С | $A_F$, °С (см. прим. 2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Флюс ОФ-6 | — | | | | |
| 10ХН1М | АДС, проволока Св-10НМА | ГОСТ 2246-70 | 10 | 0 | — | — |
| | Флюс АН-42, АН-42М | — | | | | |
| | Флюс КФ-31 | — | | | | |
| | Проволока Св-08ХНМ | ГОСТ 2246-70 | 10 | 0 | — | — |
| | Флюс КФ-31 | — | | | | |
| | РДС, электроды УОНИИ-13/45А, УОНИИ-13/55 | — | 20 | 20 | — | — |
| | Электроды Н-25 | — | 0 | 0 | — | — |
| 10ХН1М (ВК-1А) | АДС, проволока Св-10НМА | ГОСТ 2246-70 | 0 | 0 | — | — |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Флюс АН-42, АН-42М | — | | | | |
| | Флюс КФ-31 | — | | | | |
| | Проволока Св-08ХНМ | ГОСТ 2246-70 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюс КФ-31 | | | | | |
| | РДС, электроды Н-25 | — | 0 | 0 | — | — |
| 22К | АДС, проволока Св-06А | ТУ 14-1-1569-75 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюсы АН-42, АН-42М | — | | | | |
| | Проволока Св-08ГСМТ, Св-10ГСМТ | ГОСТ 2246-70 | 40 | 20 | — | — |
| | Флюс АН-42 | — | | | | |
| | Проволока Св-08ГС | ГОСТ 2246-70 | 15 | 30 | — | — |
| | Флюс ФЦ-16 | ТУ 108.949-80 | | | | |
| | Проволока Св-08ГСМТ, Св-08ГС | ГОСТ 2246-70 | 0 | 0 | — | — |
| | Флюс КФ-30 | ТУ 5.965-11090-78 | | | | |

*Продолжение табл. 5.11*

| Марка основного материала | Вид сварки, марка сварного материала | Стандарт или технические условия | $T_{k0}$, °С | $\Delta T_T$, °С (см. прим. 1) | Температура облучения, °С | $A_F$, °С (см. прим. 2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | РДС, электроды УОНИИ-13/45, УОНИИ-13/45А, УОНИИ-13/55 | — | 20 | 20 | — | — |
| 22К | ЭШС, проволока Св-10Г2 | ГОСТ 2246-70 | 40 | 20 | — | — |
| | Флюс АН-8М | ГОСТ 9087-81 | | | | |
| 10ГН2МФА | АДС, проволока Св-10ГНМА | ТУ 14-1-2860-79 | 15 | 10 | — | — |
| | Св-10ГН1МА | ТУ 14-1-2860-79 | | | | |
| | Флюс АН-17М | ГОСТ 9087-81 | | | | |
| | ФЦ-16 | ТУ 108.949-80 | | | | |
| | РДС, электроды ПТ-30 | ОСТ 108.948.01-80 | 15 | 10 | — | — |
| | ЭШС, проволока Св-10ГН2МФА | ТУ 14-1-2860-79 | 15 | 10 | — | — |
| | Флюс ОФ-6 | — | | | | |

Примечания: 1. Значения $\Delta T_T$ приведены для температур до 350° С.

2. Значения $A_F$ определяются из соотношений $A_F = 800(P + 0{,}07\ Cu)$ при температуре облучения 270° С, $A_F = 800(P + 0{,}07\ Cu) + 8$ при температуре облучения 250° С, где P и Cu — содержание фосфора и меди, %.

3. АДС — автоматическая дуговая сварка под флюсом; РДС — ручная дуговая сварка; ЭШС — электрошлаковая сварка.

гающихся нейтронному облучению при $F_n \geqslant 10^{22}$ нейтр./м$^2$ ($E \geqslant$ $\geqslant 0{,}5$ МэВ) при температурах 250—350° С, допускается принимать $\Delta T_T = 0$.

5.8.5. Расчет при нормальных условиях эксплуатации.

5.8.5.1. Сопротивление хрупкому разрушению следует считать обеспеченным, если выполняется условие

$$K_I \leqslant [K_I]_1.$$

5.8.5.2. При определении $K_I$ в качестве расчетного дефекта принимают поверхностную полуэллиптическую трещину глубиной $a = 0{,}25\,s$ с соотношением $a/c = 2/3$.

5.8.5.3. Размер $h$ допускается принимать равным $0{,}5s$.

5.8.5.4. С учетом указаний пп. 5.8.5.2 и 5.8.5.3 получим

$$K_I = \eta(0{,}7\sigma_p + 0{,}45\sigma_q)(s/10^3)^{1/2}, \text{ где}$$

$\sigma_p$ и $\sigma_q$ в МПа; $s$ в мм; $K_I$ в МПа $\cdot$ м$^{1/2}$.

5.8.5.5. Коэффициент $\eta$ для зон перехода жесткостей (соединение фланцев с цилиндрической частью корпуса, галтели и др.) определяют по формулам:

при $0 < s/R_2 \leqslant 5$

$$\eta = 1 + (K_\sigma - 1)^{0,7} \cdot 1{,}8/(s/R_2);$$

при $s/R_2 > 5$.

$$\eta = 1 + (K_\sigma - 1)^{0,7} \cdot 9/(s/R_2)^2.$$

При $\eta > K_\sigma$ принимают $\eta = K_\sigma$.

Допускается определять $\eta$ по графикам рис. 5.18.

В формулах $R_2$ — радиус кривизны концентратора в рассчитываемом сечении; $K_\sigma$ — теоретический коэффициент концентрации (допускается принимать равным значению $K_\sigma$ при растяжении).

5.8.5.6. Коэффициент $\eta$ для зон отверстий (присоединения патрубков, штуцеров, труб) определяют по формулам:

при $s/R \leqslant 0{,}8$

$$\eta = [1 + 5(K_\sigma - 1)\exp(-0{,}86s/R_1)]^{1/2};$$

при $s/R > 0{,}8$

$$\eta = [1 + 2(K_\sigma - 1)/(s/R_1)]^{1/2},$$

где $R_1$ — радиус отверстия.

Допускается $\eta$ определять по графикам на рис. 5.19.

5.8.5.7. Расчет требуется проводить только до приведенной температуры $[T - T_k]^*$, наибольшее значение которой на графике $[K_I]_1 = f[T - T_k]$ соответствует значению $[K_I]_1^*$, определяемому по формуле

$$[K_I]_1^* = 0{,}35 R_{p0,2}^T (s/10^3)^{1/2},$$

где $R_{p0,2}^T$ в МПа; $s$ в мм, $[K_I]_1^*$ в МПа $\cdot$ м$^{1/2}$.

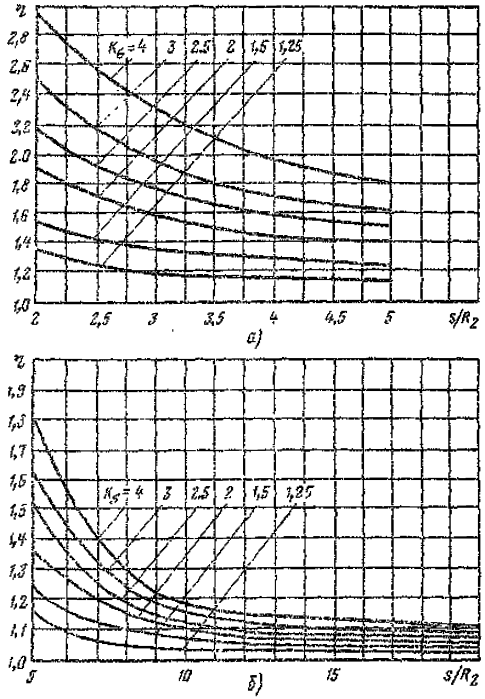



Рис. 5.18. Зависимость коэффициента η от отношения $s/R_2$ для зон перехода жесткостей:
$а$ — $2 \leqslant s/R_2 \leqslant 5$; $б$ — $s/R_2 > 5$

5.8.6. Определение минимальной допускаемой температуры конструкции при гидравлических (пневматических) испытаниях.

5.8.6.1. Гидравлические (пневматические) испытания должны проводиться в таких условиях, чтобы минимальная температура конструкции при гидравлических (пневматических) испытаниях $T_h$ была больше или равна минимально допускаемой температуре конструкции $[T_h]$, определяемой из расчета на сопротивление хрупкому разрушению.

5.8.6.2. Температуру $[T_h]$ определяют с использованием условия

$$K_1^* \leqslant [K_1]_2,$$

где $K_1^*$ — коэффициент интенсивности напряжений в рассматриваемых сечениях конструкции при гидравлических (пневматических) испытаниях.

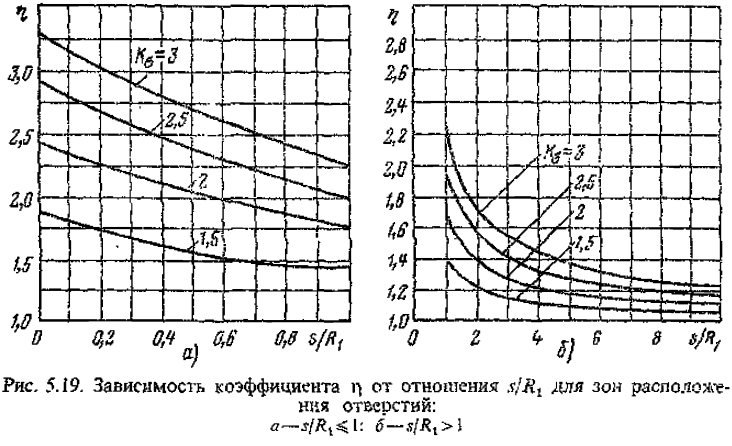



Рис. 5.19. Зависимость коэффициента η от отношения $s/R_1$ для зон расположения отверстий:
*а* — $s/R_1 \leqslant 1$; *б* — $s/R_1 > 1$

5.8.6.3. Значения $K_I^h$ определяют в соответствии с указаниями пп. 5.8.2, 5.8.5.2 и 5.8.5.3.

5.8.6.4. Принимают значение $[K_I]_2$ равным значению $K_I^h$, определенному по п. 5.8.6.3, и с использованием зависимости $[K_I]_2 = f[T - T_k]$ находят значение $[[T_h] - T_k]$ и затем, зная значение $T_k$, устанавливают значение $[T_h]$.

5.8.6.5. Условие п. 5.8.6.2 должно выполняться в течение выдержки под давлением при гидравлических (пневматических) испытаниях, при выдержке для осмотра оборудования и трубопроводов и при разогреве до температуры испытаний.

5.8.6.6. Полный расчет по определению температуры $[T_h]$ допускается не производить и принять ее равной 5° С в любом из следующих случаев:

1) выполняются условия п. 5.8.1.9 (кроме п. 4);

2) для рассматриваемого элемента выполняется условие

$$s \leqslant 4{,}5 \cdot 10^3 \left( \frac{[K_I]_2}{R^T_{p0.2}} \right)^2$$

при $s$ в мм; $[K_I]_2$ в МПа · м$^{1/2}$; $R^T_{p0.2}$ в МПа; значение $[K_I]_2$ определяют при приведенной температуре $(5 - T_k)$, где $T_k$ соответствует моменту проведения гидравлических испытаний, а значение $R_{p0.2}$ принимают при температуре 20° С.

5.8.7. Расчет при режимах ННУЭ и АС.

5.8.7.1. Сопротивление хрупкому разрушению считают обеспеченным, если выполняются условия

$K_I \leqslant [K_I]_2$ — для ННУЭ;

$K_I < [K_I]_3$ — для АС.

5.8.7.2. Расчет проводят в следующей последовательности:

1) для различных моментов времени протекания режимов ННУЭ и АС определяют в расчетных сечениях поля температур и напряжений, а для подвергаемых нейтронному облучению элементов — также распределение переноса нейтронов по толщине стенки;

2) в соответствии с указаниями п. 5.8.2 для каждого из полей напряжений определяют $\sigma_p$, $\sigma_q$, $h$;

3) зону $h$ разбивают на интервалы, границы которых обозначают координатами 0, $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$; длина одного интервала разбиения должна быть не более 1 мм на участках, где градиент напряжений более 70 МПа/мм, и не более 2 мм на участках, где градиент напряжений более 30 МПа/мм;

4) в пределах зоны $h$ определяют значения $K_I$, принимая глубину трещины равной по значению $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$, а соотношение полуосей $a/c=2/3$; значение $x_n$ не должно превышать $0{,}25s$;

5) последовательность моментов времени $t_1, t_2$, ..., $t_n$ выбирается так, чтобы значения $K_I$, рассчитанные для одной глубины $x_i$ двух последующих моментов времени, отличались друг от друга не больше, чем на 10%.

6) в точках, соответствующих концу каждого интервала $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$, устанавливают значения температур $T_1$, $T_2$, ..., $T_n$ и (для конструкций, подвергающихся облучению) значения переноса нейтронов $F_1$, $F_2$, ..., $F_n$;

7) для найденных значений температур $T_1$, $T_2$, ..., $T_n$ с учетом значений критической температуры хрупкости $T_k$ определяют приведенные температуры $(T_1-T_k)$, $(T_2-T_k)$, ..., $(T_n-T_k)$ и по температурной зависимости

$$[K_I]_2=f[T-T_k] \text{ или } [K_I]_3=f[T-T_k]$$

устанавливают для каждой из точек $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$ значения $[K_I]_2$ или $[K_I]_3$;

8) в каждой точке $x_1$, $x_2$, ..., $x_n$ сравнивают значения $K_I$, определенные по п. 4), и значения $[K_I]_2$ или $[K_I]_3$, определенные по п. 7), и проверяют выполнение условия п. 5.8.7.1;

9) расчет следует проводить в пределах до приведенной температуры, наибольшее значение которой соответствует на графике $[K_I]_2=f[T-T_k]$ значению $[K_I]_2^*=\beta_1 R_{p0,2}^T(s/10^3)^{1/2}$ или на графике $[K_I]_3=f[T-T_k]$ значению $[K_I]_3^*=\beta_2 R_{p0,2}^T(s/10^3)^{1/2}$, где $[K_I]_2$ или $[K_I]_3$ в МПа·м$^{1/2}$; $R_{p0,2}^T$ в МПа, $s$ в мм, а значения $\beta_1$ и $\beta_2$ определяют по табл. 5.12.

Таблица 5.12. **Значения коэффициентов $\beta_1$ и $\beta_2$**

| $a/s$ | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\beta_1$ | 0,267 | 0,360 | 0,405 | 0,445 | 0,465 |
| $\beta_2$ | 0,40 | 0,54 | 0,61 | 0,67 | 0,70 |

## 5.9. РАСЧЕТ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

5.9.1. При поверочном расчете на длительную прочность следует рассматривать все эксплуатационные режимы, проходящие при температурах, превышающих $T_t$, включая нарушения нормальных условий эксплуатации. Условия прочности элементов конструкций приведены в табл. 5.13 и пояснены в следующих пунктах.

5.9.2. Элемент конструкции, рассчитываемый на длительную статическую прочность, должен удовлетворять:

1) условиям прочности, принимаемым при выборе основных размеров, во всем интервале эксплуатационных температур;

2) условиям, принимаемым при расчете на статическую прочность, во всем интервале эксплуатационных температур.

5.9.3. Приведенные напряжения категорий $(\sigma)_2$ и $(\sigma)_{RV}$, $(\sigma)_{RK}$ при расчете на длительную статическую прочность оболочек и трубопроводов должны удовлетворять следующим условиям:

$$(\sigma)_2 \leqslant K_t[\sigma] \quad \text{и} \quad (\sigma)_{RV},\ (\sigma)_{RK} \leqslant K_t'[\sigma],$$

где $[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение,

$$[\sigma] = R_{mt}^T / n_{mt};$$

$n_{mt}$ — коэффициент запаса, принимаемый в соответствии с разд. 3.4; $K_t$ — коэффициент приведения напряжений $(\sigma)_2$ к мембранным, определяемый в зонах мембранных или местных мембранных напряжений по формулам

$$K_t = 1{,}25 - 0{,}25(\sigma)_m/[\sigma] \quad \text{или} \quad K_t = 1{,}25 - 0{,}25(\sigma)_{mL}/[\sigma];$$

$K_t'$ — коэффициент приведения напряжений $(\sigma)_{RV}$, $(\sigma)_{RK}$ к мембранным, определяемый в зонах мембранных или местных мембранных напряжений по формулам

$$K_t' = 1{,}75 - 0{,}25(\sigma)_m/[\sigma] \quad \text{или} \quad K_t' = 1{,}75 - 0{,}25(\sigma)_{mL}/[\sigma].$$

Предел длительной прочности $R_{mt}^T$ при определении $[\sigma]$ выбирают для суммарной длительности нагружения рассматриваемыми напряжениями при расчетной температуре.

Если ресурс эксплуатации оболочки включает два или более режима нагружения, отличающихся по приведенному напряжению или расчетной температуре, то должно выполняться условие по накопленному длительному статическому повреждению

$$\sum_i^k \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1,$$

где $t_i$ — время нагружения рассматриваемым приведенным напряжением в течение $i$-го режима при температуре $T_i$ за весь

Таблица 5.13. **Условия прочности элементов конструкции**

| Тип конструкции | Расчетная группа категорий напряжений | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $(\sigma)_1$ | $(\sigma)_2$ | $(\sigma)_{RV}$ или $(\sigma)_{RK}$ | $(\sigma)_{3w}$ | $(\sigma)_{4w}$ |
| Элементы корпусов реакторов, парогенераторов, сосудов | $\begin{cases} [\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | $\begin{cases} K_t[\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | $\begin{cases} K'_t[\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | — | — |
| Трубопроводы и трубчатые компенсаторы | $\begin{cases} [\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | $\begin{cases} K_t[\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | $\begin{cases} K'_t[\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | — | — |
| Компенсирующие устройства (торовые, волнистые) | $\begin{cases} [\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | $\begin{cases} K_t[\sigma] \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | — | — | — |
| Болты и шпильки | $\begin{cases} [\sigma]_{wt} \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | — | — | $\begin{cases} 1{,}8[\sigma]_{wt} \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ | $\begin{cases} 2{,}7[\sigma]_{wt} \\ \sum_{i=1}^{k} \frac{t_i}{[t]_i} \leqslant 1 \end{cases}$ |

ресурс эксплуатации (учитывается только время нагружения при температурах выше $T_t$); $[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по кривой длительной прочности или таблицам приложения 7, соответствующее температуре $T_i$ и приведенному напряжению на $i$-м режиме, умноженному на множитель $1{,}5/K_t$ или $1{,}5/K'_t$; $i$ — число режимов нагружения, отличающихся температурой $T_i$ или приведенным напряжением.

5.9.4. Напряжение категории $(\sigma)_{3w}$ в болтах или шпильках не должно превышать $1{,}8[\sigma]_{wt}$, где номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]_{wt} = R^T_{mt}/n_{mt}$. Коэффициент запаса $n_{mt}$ принимают в соответствии с разд. 3.5.

Если ресурс эксплуатации включает два или более режимов нагружения, отличающихся по напряжению или расчетной температуре, то должно выполняться условие прочности по накопленному длительному статическому повреждению, приведенное в п. 5.9.3, с той разницей, что в этом случае:

$t_i$ — время нагружения болта или шпильки напряжением $(\sigma)_{3wi}$ при температуре $T_i$ за весь ресурс;

$[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по кривой длительной прочности или таблицам приложения 7, соответствующее температуре $T_i$ и напряжению $1{,}65(\sigma)_{3wi}$;

$i$ — число режимов нагружения, отличающихся температурой $T_i$ или напряжением $(\sigma)_{3wi}$.

5.9.5. Напряжение категории $(\sigma)_{4w}$ в болтах или шпильках не должно превышать $2{,}7[\sigma]_{wt}$, где номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]_{wt} = R^T_{mt}/n_{mt}$. Коэффициент запаса $n_{mt}$ принимают в соответствии с разд. 3.5.

Если ресурс эксплуатации включает два или более режимов нагружения, отличающихся по напряжению или расчетной температуре, то должно быть выполнено условие по накопленному длительному статическому повреждению, приведенное в п. 5.9.3, с той разницей, что в этом случае:

$t_i$ — время нагружения болта или шпильки напряжением $(\sigma)_{4wi}$ при температуре $T_i$ за весь ресурс;

$[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по кривой длительной прочности или таблицам приложения 7, соответствующее температуре $T_i$ и напряжению $1{,}1(\sigma)_{4wi}$.

5.9.6. Среднее касательное напряжение в шпонках, штифтах и т. п., вызванное действием срезывающих усилий от механических и компенсационных нагрузок, действующих на оборудование, не должно превышать $0{,}5[\sigma]$, где номинальное допускаемое напряжение $[\sigma] = R_{mt}/n_{mt}$. Коэффициенты запаса $n_{mt}$ принимают в соответствии с разд. 3.4 для шпонок, штифтов и т. п. и по разд. 3.5 для болтов и шпилек.

5.9.7. Расчет на длительную статическую прочность омываемых натрием элементов контура из аустенитных сталей, если в том же контуре находятся элементы из углеродистых или

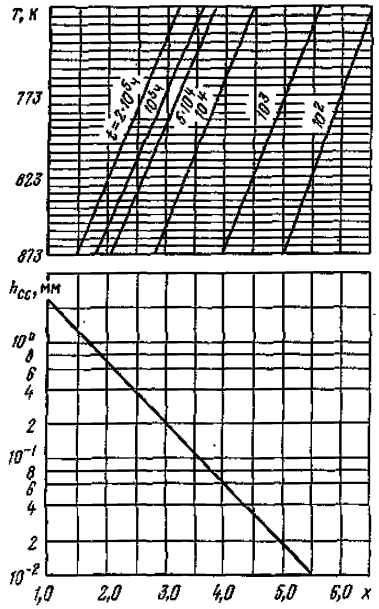



Рис. 5.20. Диаграмма науглероживания стали 12Х18Н10Т в натрии ($x=6050/T-\lg t$)

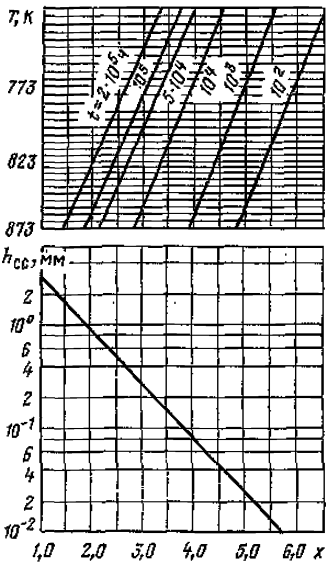



Рис. 5.21. Диаграмма науглероживания стали 12Х16Н15М3Б в натрии ($x=6050/T-\lg t$)

легированных сталей, проводят по пп. 5.9.1—5.9.3, если глубина зоны науглероживания $h_{cc}$ для заданного времени и температуры не превышает расчетной толщины стенки элемента.

Для контура с натрием реакторной чистоты значение $h_{cc}$ определяют по рис. 5.20 и 5.21.

## 5.10. РАСЧЕТ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ

5.10.1. Расчет на прогрессирующее формоизменение проводят применительно к элементам конструкций, для которых остаточные изменения формы в работе недопустимы или ограничены заданными пределами по условиям нормальной эксплуатации конструкции (по условиям работоспособности подвижных соединений, разбираемости разъемных соединений, стабильности зазоров, обеспечивающих гидравлические характеристики, и т. п.).

Рекомендуемый метод расчета на прогрессирующее формоизменение приведен в приложении 4.

5.10.2. Расчет проводят для нормальных и при нарушении нормальных условий эксплуатации с учетом всех расчетных нагрузок, указанных в п. 5.1.3, кроме сейсмических и вибрационных.

5.10.3. Найденные расчетом значения перемещений, накопленных в элементе конструкции в течение заданного срока службы с учетом числа повторений эксплуатационных режимов, не должны превышать допускаемых, установленных на основании эксплуатационных требований.

## 5.11. РАСЧЕТ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

5.11.1. Общие положения.

5.11.1.1. При выполнении расчета на сейсмические воздействия дополнительно используются следующие термины, определения и обозначения:

Сейсмичность площадки строительства АЭУ — интенсивность возможных сейсмических воздействий для площадки строительства с соответствующими категориями повторяемости за нормативный срок; устанавливается в соответствии с картами сейсмического районирования и микрорайонированием площадки строительства; измеряется в баллах по шкале MSK-64.

Отметка оборудования или трубопровода — высота точки крепления оборудования или трубопровода относительно нижней плоскости фундамента здания.

Максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) — землетрясение со средней повторяемостью до 10 000 лет.

Проектное землетрясение (ПЗ) — землетрясение со средней повторяемостью до 100 лет.

Акселерограмма — зависимость от времени абсолютного ускорения точки крепления оборудования или трубопровода для одного направления для определенной отметки.

Спектр ответа — совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейно-упругой системы с одной степенью свободы (осциллятора) при воздействии, заданном акселерограммой, определенных в зависимости от собственной частоты и параметра демпфирования осциллятора.

Обобщенный спектр ответа — спектр, полученный по результатам обработки спектров ответа для набора акселерограмм:

$(\sigma_s)_s$ — напряжения смятия с учетом сейсмических нагрузок, МПа (кгс/мм$^2$);

$(\tau_s)_s$ — касательные напряжения среза с учетом сейсмических нагрузок, МПа (кгс/мм$^2$);

$k$ — относительное демпфирование (в долях критического).

5.11.1.2. Расчет проводят для АЭУ с сейсмичностью площадки 5 баллов и выше.

Необходимость расчетов оборудования и трубопроводов для АЭУ с сейсмичностью площадки 4 балла определяется проектной (конструкторской) организацией.

5.11.1.3. Настоящие нормы содержат требования к выполнению расчетов на прочность при сейсмических воздействиях оборудования и трубопроводов, подразделяемых на группы А, В и С в соответствии с Правилами АЭУ.

5.11.1.4. При расчете оборудование и трубопроводы разделяют на две категории (I и II).

5.11.1.5. К I категории относят оборудование и трубопроводы групп А и В.

5.11.1.6. Ко II категории относят оборудование и трубопроводы группы С.

5.11.1.7. Рекомендуемые методы расчета оборудования и трубопроводов на сейсмические воздействия указаны в приложении 9.

5.11.2. Требования к расчету.

5.11.2.1. Исходными данными для расчета являются:

1) воздействия от землетрясений (ПЗ и МРЗ) в виде акселерограмм и спектров ответа для оборудования и трубопроводов для трех взаимно перпендикулярных направлений (вертикального и двух горизонтальных);

2) нагрузки при режимах НУЭ и в необходимых случаях при режимах ННУЭ и АС.

5.11.2.2. Сейсмические нагрузки на оборудование и трубопроводы определяют с учетом одновременного сейсмического воздействия в двух горизонтальных и вертикальном направлениях.

5.11.2.3. Для определения сейсмических нагрузок могут быть использованы:

1) три акселерограммы для трех взаимно перпендикулярных направлений;

2) спектры реакций, соответствующие заданным акселерограммам;

3) обобщенные спектры реакций.

5.11.2.4. Значение относительного демпфирования принимают равным $k=0{,}02$. При наличии экспериментального обоснования допускается использование других значений.

5.11.2.5. Оценку прочности оборудования и трубопроводов при сейсмических воздействиях выполняют с учетом требований п. 1.2.14.

5.11.2.6. Необходимость учета совместного воздействия сейсмических нагрузок с нагрузками режимов ННУЭ и АС устанавливается проектной конструкторской организацией.

5.11.2.7. Оборудование и трубопроводы I категории должны рассчитываться на сочетание нагрузок НУЭ+МРЗ и НУЭ+ПЗ. В случае, если принятые для расчета акселерограммы ПЗ и МРЗ различаются только амплитудами, допускается не рассматривать сочетание нагрузок НУЭ+ПЗ.

5.11.2.8. Оборудование и трубопроводы II категории должны рассчитываться на сочетание нагрузок НУЭ+ПЗ.

5.11.2.9. Расчет выполняют линейно-спектральным методом (по спектрам ответа) или методом динамического анализа (по акселерограммам).

Если первая собственная частота колебаний больше 20 Гц, расчет допускается выполнять статическим методом с умножением ускорений, полученных по спектру ответа, на коэффициент 1,3 для частоты в диапазоне 20—33 Гц и на коэффициент 1,0 для частоты больше 33 Гц.

5.11.2.10. Определение напряжений и деформаций допускается проводить в предположении статического воздействия найденных расчетом сейсмических нагрузок на оборудование и трубопроводы.

5.11.2.11. Напряжения в оборудовании и трубопроводах должны удовлетворять требованиям табл. 5.14 и 5.15.

5.11.2.12. Средние напряжения смятия не должны превышать значений, приведенных в табл. 5.16.

5.11.2.13. Средние касательные напряжения не должны превышать значений, приведенных в табл. 5.17.

5.11.2.14. Расчет на циклическую прочность проводят по разд. 5.6.

Расчет допускается проводить, используя максимальную амплитуду напряжений, определенную с учетом воздействий НУЭ+ПЗ. При этом число циклов нагружения принимают равным 50.

Указанный расчет допускается не проводить, если суммарная повреждаемость от нагрузок, действующих на оборудование и трубопроводы без учета сейсмических воздействий в процессе эксплуатации АЭУ, не превышает 0,8.

Таблица 5.14. **Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для оборудования и трубопроводов**

| Категория | Сочетание нагрузок | Расчетная группа категорий напряжений | Допускаемое напряжение |
|---|---|---|---|
| I | НУЭ+МРЗ | $(\sigma_s)_1$<br>$(\sigma_s)_2$ | 1,4 [σ]<br>1,8 [σ] |
| | НУЭ+ПЗ | $(\sigma_s)_1$<br>$(\sigma_s)_2$ | 1,2 [σ]<br>1,6 [σ] |
| II | НУЭ+ПЗ | $(\sigma_s)_1$<br>$(\sigma_s)_2$ | 1,5 [σ]<br>1,9 [σ] |

Примечание. Для трубопроводов АЭУ, прошедших оценку прочности на этапах статических расчетов, допускается проверку прочности от сейсмических нагрузок по мембранным напряжениям $(\sigma_s)_1$ не проводить.

Таблица 5.15. **Сочетание нагрузок и допускаемые напряжения для болтов и шпилек**

| Категория | Сочетание нагрузок | Расчетная группа категорий напряжений | Допускаемое напряжение |
|---|---|---|---|
| I | НУЭ+МРЗ | $(\sigma_s)_{mw}$<br>$(\sigma_s)_{4w}$ | $1{,}4\,[\sigma]_w$<br>$2{,}2\,[\sigma]_w$ |
| | НУЭ+ПЗ | $(\sigma_s)_{mw}$<br>$(\sigma_s)_{4w}$ | $1{,}2\,[\sigma]_w$<br>$2{,}0\,[\sigma]_w$ |
| II | НУЭ+ПЗ | $(\sigma_s)_{mw}$<br>$(\sigma_s)_{4w}$ | $1{,}5\,[\sigma]_w$<br>$2{,}3\,[\sigma]_w$ |

Таблица 5.16. **Сочетание нагрузок и допускаемые напряжения смятия**

| Категория | Сочетание нагрузок | Категория напряжений | Допускаемое напряжение |
|---|---|---|---|
| I | НУЭ+МРЗ<br>НУЭ+ПЗ | $(\sigma_s)_s$ | $2{,}7\,[\sigma]$<br>$2{,}5\,[\sigma]$ |
| II | НУЭ+ПЗ | $(\sigma_s)_s$ | $3{,}0\,[\sigma]$ |

Таблица 5.17. **Сочетание нагрузок и допускаемые касательные напряжения среза**

| Категория | Сочетание нагрузок | Категория напряжений | Допускаемые напряжения | |
|---|---|---|---|---|
| | | | в болтах и шпильках | в элементах конструкций, кроме болтов и шпилек |
| I | НУЭ+МРЗ<br>НУЭ+ПЗ | $(\tau_s)_s$ | $0{,}7\,[\sigma]_w$<br>$0{,}6\,[\sigma]_w$ | $0{,}7\,[\sigma]$<br>$0{,}6\,[\sigma]$ |
| II | НУЭ+ПЗ | $(\tau_s)_s$ | $0{,}8\,[\sigma]_w$ | $0{,}8\,[\sigma]$ |

5.11.2.15. При расчете на устойчивость допускаемые напряжения принимают:

при $\sigma_{kr} < R^T_{p0,2}$ $\quad [\sigma_c] = 0{,}7\sigma_{kr}$;

при $\sigma_{kr} \geq R^T_{p0,2}$ $\quad [\sigma_c] = 0{,}7R^T_{p0,2}$.

5.11.2.16. Оценку трубопроводов по допускаемым напряжениям устойчивости можно не проводить.

5.11.2.17. Допускаемые перемещения (прогиб, сдвиг, смещение и т. п.) определяются в зависимости от эксплуатационных

условий (выбор зазора, недопустимые перекосы, недопустимые соударения, разуплотнение герметичных стыков и т. п.).

5.11.2.18. Рекомендуемые методы расчета на сейсмические воздействия приведены в приложении 9.

## 5.12. РАСЧЕТ НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ

5.12.1. Расчет на вибропрочность проводят применительно к элементам конструкций, подвергающихся вибрационному нагружению.

5.12.2. Расчет на вибропрочность содержит:

1) определение спектра собственных частот колебаний и проверку условия их отстройки от детерминированных частот возмущения;

2) проверку на отсутствие виброударных взаимодействий элементов конструкций с целью исключения повышенного износа;

3) расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений.

5.12.3. Рекомендуемые методы расчетно-экспериментальной оценки вибропрочности приведены в приложении 8.

5.12.4. Расчет на циклическую прочность с учетом вибронагруженности проводят по методике, изложенной в разд. 5.6 настоящих Норм.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 1*
(обязательное)

# ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица П1.1. **Механические свойства сталей и сплавов**
**(в пределе «от» и «до» включаются обе значащие цифры)**

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| Ст3сп5 | Горячекатаная сортовая фасонная и листовая сталь толщиной до 20 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 353 (36) | 343 (35) | 323 (33) | 284 (29) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 245 (25) | 235 (24) | 235 (24) | 235 (24) | 235 (24) | 206 (21) | 186 (19) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 26 | 24 | 22 | 20 | 20 | 20 | 20 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 49 | 49 | 48 | 47 | 47 | 48 | — | — | — | — | — | — |
| | То же, толщиной более 20 до 100 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 353 (36) | 343 (35) | 323 (33) | 284 (29) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 177 (18) | 157 (16) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 23 | 21 | 19 | 18 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 49 | 49 | 48 | 47 | 47 | 48 | — | — | — | — | — | — |
| | То же, толщиной более 100 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 353 (36) | 343 (35) | 323 (33) | 284 (29) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 177 (18) | 157 (16) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 23 | 21 | 19 | 18 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 49 | 49 | 48 | 47 | 47 | 48 | — | — | — | — | — | — |
| | Трубы | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 343 (35) | 343 (35) | 323 (33) | 324 (33) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 177 (18) | 157 (16) | — | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $A$, % | 23 | 21 | 19 | 18 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 49 | 49 | 48 | 47 | 47 | 48 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром или толщиной до 300 мм, КП175* | $R_m^T$, МПа | 355 | 343 | 333 | 333 | 314 | 304 | 275 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (36) | (35) | (34) | (34) | (32) | (31) | (28) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 175 | 167 | 167 | 167 | 157 | 147 | 137 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (18) | (17) | (17) | (17) | (16) | (15) | (14) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 24 | 22 | 20 | 18 | 17 | 17 | 17 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 47 | 44 | 41 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром или толщиной до 300 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа | 390 | 390 | 373 | 373 | 363 | 333 | 304 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (40) | (40) | (38) | (38) | (37) | (34) | (31) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 195 | 195 | 195 | 195 | 177 | 167 | 147 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (20) | (20) | (18) | (17) | (15) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 23 | 21 | 20 | 18 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 47 | 44 | 41 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| То же, до 50 мм, КП215* | $R_m^T$, МПа | 420 | 422 | 402 | 402 | 392 | 373 | 333 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (44) | (43) | (41) | (41) | (40) | (38) | (34) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 215 | 206 | 206 | 206 | 196 | 196 | 167 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (22) | (21) | (21) | (21) | (20) | (20) | (17) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 23 | 21 | 20 | 18 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 47 | 44 | 41 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Трубы холодно- и теплодеформированные бесшовные наружным диаметром от 5 до 250 мм, с толщиной стенки от 0,3 до 20 мм; наружным диаметром от 6 до 250 мм, с | $R_m^T$, МПа | 343 | 333 | 333 | 333 | 333 | 323 | 314 | 294 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (35) | (34) | (34) | (34) | (34) | (33) | (32) | (30) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 206 | 196 | 195 | 181 | 176 | 157 | 137 | 118 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (21) | (20) | (19) | (18,5) | (18) | (16) | (14) | (12) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 24 | 20 | 18 | 18 | 19 | 21 | 23 | 24 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 46 | 40 | 40 | 40 | 42 | 44 | 48 | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. КП490*—категория прочности, цифра—значение предела текучести при 20° С; КП490**—категория прочности, цифра—значение предела текучести при 300° С.

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 10 | толщиной стенки от 1,6 до 24 мм; наружным диаметром от 6 до 160 мм, с толщиной стенки от 2 до 22 мм | | | | | | | | | | | | | | |
| | Сортовая горячекатаная и кованая сталь толщиной или диаметром до 80 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 323 (33) | 314 (32) | 294 (30) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 186 (19) | 186 (19) | 186 (19) | 177 (18) | 177 (18) | 157 (16) | 137 (14) | 118 (12) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 31 | 28 | 26 | 22 | 25 | 24,5 | 25,5 | 28 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 50 | 50 | 46 | 44 | 44 | 44 | 46 | — | — | — | — | — |
| 15 | Сортовая горячекатаная сталь толщиной или диаметром до 80 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 373 (38) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 343 (35) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 226 (23) | 216 (22) | 216 (22) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | 196 (20) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 27 | 26 | 25 | 25 | 24 | 23 | 23 | 23 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 51 | 47 | 43 | 39 | 38 | 38 | 38 | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром до 300 мм, КП175* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 355 (36) | 343 (35) | 333 (34) | 324 (33) | 314 (32) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 175 (18) | 167 (17) | 157 (16) | 147 (15) | 147 (15) | 128 (13) | 118 (12) | 118 (12) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 19 | 18 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, до | $R_m^T$, МПа | 390 | 383 | 373 | 363 | 353 | 343 | 333 | 324 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100 мм, КП195* | (кгс/мм$^2$) | (40) | (39) | (38) | (37) | (36) | (35) | (34) | (33) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 195 | 195 | 177 | 167 | 167 | 147 | 128 | 128 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (18) | (17) | (17) | (15) | (13) | (13) | | | | | |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 38 | 38 | 38 | 36 | 36 | 35 | 35 | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром до 50 мм, КП215* | $R^T_m$, МПа | 430 | 422 | 402 | 392 | 383 | 363 | 363 | 363 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (44) | (43) | (41) | (40) | (39) | (37) | (37) | (37) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 215 | 206 | 186 | 177 | 177 | 157 | 147 | 147 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (22) | (21) | (19) | (18) | (18) | (16) | (15) | (15) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 24 | 21 | 18 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 53 | 47 | 44 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| 15Л | Отливки с толщиной стенки до 100 мм | $R^T_m$, МПа | 392 | 392 | 373 | 363 | 363 | 353 | 343 | 333 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (40) | (38) | (37) | (37) | (36) | (35) | (34) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 196 | 196 | 196 | 177 | 157 | 147 | 138 | 118 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (20) | (18) | (16) | (15) | (14) | (12) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 24 | 23 | 23 | 23 | 22 | 21 | 21 | 21 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 34 | 34 | 33 | 32 | 30 | — | — | — | — | — |
| 20 | Поковки диаметром до 300 мм, КП175* | $R^T_m$, МПа | 355 | 343 | 333 | 323 | 323 | 294 | 294 | 294 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (36) | (35) | (34) | (33) | (33) | (30) | (30) | (30) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 175 | 167 | 167 | 167 | 167 | 157 | 147 | 128 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (18) | (17) | (17) | (17) | (17) | (16) | (15) | (13) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП195* | $R^T_m$, МПа | 390 | 390 | 373 | 363 | 363 | 343 | 333 | 323 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (40) | (38) | (37) | (37) | (35) | (34) | (33) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 195 | 195 | 195 | 195 | 195 | 177 | 157 | 137 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (18) | (16) | (14) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром до 300 мм, КП215* | $R^T_m$, МПа | 430 | 422 | 422 | 412 | 402 | 402 | 392 | 373 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (44) | (43) | (43) | (42) | (41) | (41) | (40) | (38) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 215 | 206 | 206 | 206 | 196 | 196 | 177 | 157 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (22) | (21) | (21) | (21) | (20) | (20) | (18) | (16) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 19 | 19 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, от 100 до 300 мм, КП245* | $R^T_m$, МПа | 470 | 461 | 461 | 451 | 441 | 441 | 432 | 422 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (48) | (47) | (47) | (46) | (45) | (45) | (44) | (43) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 235 | 235 | 235 | 226 | 226 | 196 | 177 | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 20 | | (кгс/мм²) | (25) | (24) | (24) | (24) | (23) | (23) | (20) | (18) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 18 | 18 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | Горячекатаная сталь толщиной или диаметром до 80 мм; трубы горячедеформированные наружным диаметром от 10 до 465 мм, с толщиной стенки от 2 до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 402 | 392 | 392 | 392 | 373 | 373 | 363 | 353 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (41) | (40) | (40) | (40) | (38) | (38) | (37) | (36) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 216 | 206 | 206 | 206 | 196 | 196 | 177 | 157 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (22) | (21) | (21) | (21) | (20) | (20) | (18) | (16) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 38 | 38 | 38 | 38 | 40 | 42 | — | — | — | — | — |
| | Отожженные, высокоотпущенные листы толщиной от 4 до 80 мм | $R_m^T$, МПа | 373 | 363 | 353 | 343 | 343 | 333 | 333 | 323 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (38) | (37) | (36) | (35) | (35) | (34) | (34) | (33) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 216 | 216 | 216 | 206 | 206 | 196 | 176 | 157 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (22) | (22) | (22) | (21) | (21) | (20) | (18) | (16) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 28 | 27 | 27 | 25 | 24 | 24 | 24 | 24 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 43 | 43 | 42 | 42 | 42 | 44 | 46 | — | — | — | — | — |
| | Листовые заготовки толщиной от 20 до 250 мм (поперечное направление) | $R_m^T$, МПа | 353 | 343 | 334 | 324 | 304 | 294 | 284 | 275 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (36) | (35) | (34) | (33) | (31) | (30) | (29) | (28) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 176 | 176 | 176 | 157 | 157 | 147 | 147 | 137 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (18) | (18) | (18) | (16) | (16) | (15) | (15) | (14) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 19 | 18 | 18 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | | | | |
| 20Л | Отливки с толщиной | $R_m^T$, МПа | 412 | 412 | 412 | 392 | 370 | 370 | 370 | 360 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (42) | (42) | (42) | (40) | (38) | (38) | (38) | (37) | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | стенки до 100 мм | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 216 (22) | 216 (22) | 196 (20) | 176 (18) | 170 (17,5) | 165 (17) | 157 (16) | 137 (14) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 33 | 32 | — | — | — | — | — | — |
| 20К | Листы толщиной от 4 до 60 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 402 (41) | 397 (40,5) | 397 (40,6) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | 363 (37) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 216 (22) | 206 (21) | 206 (21) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 177 (18) | 157 (16) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 23 | 21 | 20 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 48 | 47 | 47 | 47 | 47 | 49 | 51 | — | — | — | — | — | — |
| 22К | Листы толщиной от 70 до 170 мм, КП215* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 430 (44) | 430 (44) | 430 (44) | 430 (44) | 430 (44) | 421 (43) | 412 (42) | 392 (40) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 215 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 186 (19) | 186 (19) | 186 (19) | 186 (19) | 177 (18) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | 17 | 18 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 39 | 38 | 38 | 38 | 39 | 40 | — | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром от 300 до 800 мм, КП195* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 390 (40) | 390 (40) | 390 (40) | 383 (39) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 353 (36) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 195 (20) | 186 (19) | 177 (18) | 167 (17) | 167 (17) | 157 (16) | 157 (16) | 137 (14) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 15 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 38 | 38 | 36 | 36 | 35 | 34 | 34 | — | — | — | — | — | — |
| | То же, от 100 до 800 мм, КП215* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 430 (44) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 353 (36) | 343 (35) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 215 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 186 (19) | 186 (19) | 186 (19) | 186 (19) | 177 (18) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 14 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 33 | 33 | 32 | 31 | 31 | — | — | — | — | — | — |
| 25 | Поковки диаметром до 500 мм, КП175* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 350 (36) | 343 (35) | 333 (34) | 323 (33) | 323 (33) | 304 (31) | 294 (30) | 294 (30) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 175 (18) | 167 (17) | 157 (16) | 147 (15) | 137 (14) | 128 (13) | 118 (12) | 108 (11) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — | — | — | — | — |
| | То же, до 500 мм, КП195* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 390 (40) | 390 (40) | 373 (38) | 363 (37) | 363 (37) | 343 (35) | 333 (34) | 323 (33) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 195 (20) | 195 (20) | 177 (18) | 167 (17) | 157 (16) | 137 (14) | 128 (13) | 118 (12) | — | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 25 | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 44 | — | — | — | — | — |
| | То же, до | $R_m^T$, МПа | 430 | 422 | 422 | 412 | 402 | 402 | 402 | 373 | — | — | — | — | — |
| | 300 мм, | (кгс/мм²) | (44) | (43) | (43) | (42) | (41) | (41) | (41) | (38) | — | — | — | — | — |
| | КП215* | $R_{p0,2}^T$, МПа | 215 | 206 | 196 | 177 | 167 | 147 | 137 | 118 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (22) | (21) | (20) | (18) | (17) | (15) | (14) | (12) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 44 | — | — | — | — | — |
| | То же, до | $R_m^T$, МПа | 470 | 461 | 461 | 451 | 441 | 441 | 441 | 412 | — | — | — | — | — |
| | 100 мм, | (кгс/мм²) | (48) | (47) | (47) | (46) | (45) | (45) | (45) | (42) | — | — | — | — | — |
| | КП245* | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 235 | 226 | 206 | 196 | 167 | 157 | 118 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (24) | (23) | (21) | (20) | (17) | (16) | (12) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 44 | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром от | $R_m^T$, МПа | 530 | 510 | 500 | 481 | 481 | 451 | 441 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (54) | (52) | (51) | (49) | (49) | (46) | (45) | (45) | — | — | — | — | — |
| | 100 до 300 мм, | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 255 | 245 | 226 | 216 | 196 | 186 | 167 | — | — | — | — | — |
| | КП275* | (кгс/мм²) | (28) | (26) | (25) | (23) | (22) | (20) | (19) | (17) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | — | — | — | — | — |
| 25Л | Отливки с | $R_m^T$, МПа | 441 | 432 | 432 | 422 | 422 | 400 | 380 | 370 | — | — | — | — | — |
| | толщиной | (кгс/мм²) | (45) | (44) | (44) | (43) | (43) | (41) | (39) | (38) | — | — | — | — | — |
| | стенки до | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 226 | 216 | 196 | 180 | 175 | 170 | 150 | — | — | — | — | — |
| | 100 мм | (кгс/мм²) | (24) | (23) | (22) | (20) | (18,5) | (18) | (17,5) | (15,5) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 18 | 17 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 28 | 26 | — | — | — | — | — |
| 30 | Поковки диаметром от | $R_m^T$, МПа | 355 | 355 | 343 | 343 | 343 | 333 | 333 | 333 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (36) | (36) | (35) | (35) | (35) | (34) | (34) | (34) | — | — | — | — | — |
| | 300 до 800 мм, | $R_{p0,2}^T$, МПа | 175 | 175 | 175 | 175 | 167 | 137 | 108 | 98 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КП175* | (кгс/мм²) | (18) | (18) | (18) | (18) | (17) | (14) | (11) | (10) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 20 | 20 | 18 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — | — |
| То же, от | $R_m^T$, МПа | 390 | 390 | 390 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | — | — | — | — | — | — | — |
| 100 до 800 мм, | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (40) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | — | — | — | — | — | — | — |
| КП195* | $R_{p0,2}^T$, МПа | 195 | 195 | 195 | 195 | 195 | 147 | 118 | 108 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (15) | (12) | (11) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 37 | 37 | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром более 100 до 800 мм, КП215* | $R_m^T$, МПа | 430 | 430 | 422 | 412 | 412 | 402 | 402 | 402 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (44) | (44) | (43) | (42) | (42) | (41) | (41) | (41) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 215 | 215 | 215 | 215 | 206 | 167 | 128 | 118 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (22) | (22) | (22) | (22) | (21) | (17) | (13) | (12) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 34 | — | — | — | — | — | — | — |
| То же, до 500 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 470 | 461 | 451 | 441 | 441 | 441 | 441 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (48) | (48) | (47) | (46) | (45) | (45) | (45) | (45) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 245 | 245 | 245 | 235 | 196 | 147 | 137 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (25) | (25) | (25) | (25) | (24) | (20) | (15) | (14) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 34 | — | — | — | — | — | — | — |
| Сортовая горячекатаная сталь диаметром или толщиной до 80 мм | $R_m^T$, МПа | 530 | 530 | 520 | 510 | 510 | 500 | 500 | 500 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (54) | (54) | (53) | (52) | (52) | (51) | (51) | (51) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 314 | 304 | 294 | 294 | 294 | 245 | 196 | 177 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (32) | (31) | (30) | (30) | (30) | (25) | (20) | (18) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 20 | 17 | 13 | 10 | 7 | 12 | 17 | 18 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром от 500 до 800 мм, КП175* | $R_m^T$, МПа | 355 | 355 | 343 | 343 | 343 | 333 | 333 | 333 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (36) | (36) | (35) | (35) | (35) | (34) | (34) | (34) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 175 | 167 | 167 | 167 | 167 | 137 | 108 | 98 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (18) | (17) | (17) | (17) | (17) | (14) | (11) | (10) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 20 | 17 | 13 | 10 | 7 | 12 | 17 | 18 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром от 300 до 800 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа | 390 | 390 | 390 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (40) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 195 | 195 | 195 | 195 | 195 | 157 | 128 | 108 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм²) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (16) | (13) | (11) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 17 | 15 | 12 | 9 | 6 | 10 | 14 | 16 | — | — | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 35 | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — | — | — | — | — |
| | То же, от 100 до 800 мм, КП215* | $R^T_m$, МПа | 430 | 430 | 422 | 412 | 412 | 402 | 402 | 402 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (44) | (44) | (43) | (42) | (42) | (41) | (41) | (41) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 215 | 206 | 206 | 206 | 206 | 177 | 137 | 128 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (22) | (21) | (21) | (21) | (21) | (18) | (14) | (13) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 12 | 9 | 6 | 5 | 9 | 13 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — | — | — | — |
| | То же, до 500 мм, КП245* | $R^T_m$, МПа | 470 | 461 | 451 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (48) | (47) | (46) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 235 | 226 | 226 | 226 | 177 | 157 | 137 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (25) | (24) | (23) | (23) | (23) | (18) | (16) | (14) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 15 | 12 | 9 | 6 | 10 | 14 | 16 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — | — | — | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП275* | $R^T_m$, МПа | 530 | 530 | 530 | 530 | 530 | 519 | 510 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (54) | (54) | (54) | (54) | (54) | (53) | (52) | (45) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 275 | 265 | 265 | 265 | 245 | 225 | 216 | 196 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (28) | (27) | (27) | (27) | (25) | (23) | (22) | (20) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 15 | 12 | 9 | 6 | 10 | 14 | 16 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром до 100 мм, КП315* | $R^T_m$, МПа | 570 | 570 | 559 | 549 | 540 | 540 | 540 | 540 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (58) | (58) | (57) | (56) | (55) | (55) | (55) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 315 | 304 | 304 | 294 | 274 | 255 | 245 | 225 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (32) | (31) | (31) | (30) | (28) | (26) | (25) | (23) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 13 | 11 | 9 | 6 | 8 | 11 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 34 | 34 | 34 | 34 | 35 | 35 | — | — | — | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей диаметром до 300 мм, | $R^T_m$, МПа | 530 | 530 | 530 | 520 | 510 | 500 | 500 | 500 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (54) | (54) | (54) | (53) | (52) | (51) | (51) | (51) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 275 | 255 | 235 | 225 | 225 | 186 | 147 | 127 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (28) | (26) | (24) | (23) | (23) | (19) | (15) | (13) | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КП275* | $A$, % | 17 | 14 | 10 | 7 | 5 | 8 | 14 | 15 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром от 300 до 800 мм, КП215* | $R_m^T$, МПа | 430 | 412 | 412 | 402 | 402 | 402 | 392 | 373 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (44) | (42) | (42) | (41) | (41) | (41) | (40) | (38) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 215 | 196 | 186 | 177 | 157 | 157 | 157 | 147 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (22) | (20) | (19) | (18) | (16) | (16) | (16) | (15) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 15 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 33 | 33 | — | — | — | — | — | — | — |
| Поковки диаметром от 100 до 500 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 451 | 451 | 441 | 422 | 422 | 422 | 412 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (48) | (46) | (46) | (45) | (43) | (43) | (43) | (42) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 226 | 206 | 196 | 196 | 177 | 177 | 167 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (25) | (23) | (21) | (20) | (20) | (18) | (18) | (17) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 15 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 33 | 33 | — | — | — | — | — | — | — |
| То же, до 800 мм, КП275* | $R_m^T$, МПа | 530 | 510 | 500 | 491 | 491 | 491 | 471 | 461 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (54) | (52) | (51) | (50) | (50) | (50) | (48) | (47) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 255 | 235 | 216 | 206 | 196 | 196 | 196 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (28) | (26) | (24) | (22) | (21) | (20) | (20) | (20) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 13 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 29 | 28 | 28 | — | — | — | — | — | — | — |
| То же, от 100 до 300 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 549 | 540 | 530 | 510 | 510 | 510 | 491 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (58) | (56) | (55) | (54) | (52) | (52) | (52) | (50) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 294 | 255 | 245 | 235 | 226 | 226 | 216 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (32) | (30) | (26) | (25) | (24) | (23) | (23) | (22) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 13 | 12 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 29 | 28 | 28 | — | — | — | — | — | — | — |
| То же, до 100 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа | 590 | 569 | 559 | 549 | 530 | 530 | 530 | 510 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (60) | (58) | (57) | (56) | (54) | (54) | (54) | (52) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 345 | 312 | 294 | 275 | 255 | 245 | 245 | 235 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (35) | (32) | (30) | (28) | (26) | (25) | (25) | (24) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — | — | — | — | — | — |
| Заготовки крепежных деталей диаметром до 300 мм, КП295* | $R_m^T$, МПа | 549 | 520 | 520 | 510 | 510 | 510 | 500 | 471 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (56) | (53) | (53) | (52) | (52) | (52) | (51) | (48) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 295 | 265 | 255 | 235 | 216 | 216 | 216 | 196 | — | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (30) | (27) | (26) | (24) | (22) | (22) | (22) | (20) | — | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 13 | 13 | 13 | 13 | 14 | 15 | — | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 37 | 37 | 35 | 35 | 35 | 35 | 37 | 37 | — | — | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 45 | Горячекатаная сортовая сталь толщиной или диаметром до 250 мм | $R_m^T$, МПа | 598 | 598 | 598 | 598 | 598 | 579 | 559 | 540 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (61) | (61) | (61) | (61) | (61) | (59) | (57) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 353 | 343 | 343 | 343 | 343 | 294 | 255 | 235 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (36) | (35) | (35) | (35) | (35) | (30) | (26) | (24) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 13 | 10 | 9 | 7 | 10 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 37 | 33 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | — | — | — | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром 300 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 569 | 569 | 569 | 569 | 569 | 549 | 530 | 510 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (58) | (58) | (58) | (58) | (58) | (56) | (54) | (52) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 304 | 304 | 294 | 274 | 255 | 245 | 225 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (32) | (31) | (31) | (30) | (28) | (26) | (25) | (23) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 17 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 35 | 35 | — | — | — | — | — |
| | То же, от 100 до 800 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 470 | 470 | 470 | 470 | 461 | 441 | 412 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (48) | (48) | (48) | (48) | (48) | (47) | (45) | (42) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 235 | 235 | 235 | 235 | 206 | 177 | 167 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (24) | (24) | (24) | (24) | (21) | (18) | (17) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 12 | 10 | 8 | 6 | 8 | 13 | 13 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | — | — | — | — | — |
| | То же, до 800 мм, КП275* | $R_m^T$, МПа | 530 | 530 | 530 | 530 | 530 | 510 | 491 | 481 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (54) | (54) | (54) | (54) | (54) | (52) | (50) | (49) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 265 | 265 | 265 | 265 | 226 | 196 | 196 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (28) | (27) | (27) | (27) | (27) | (23) | (20) | (20) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 10 | 8 | 6 | 5 | 8 | 11 | 11 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | — | — | — | — | — |
| | То же, до 800 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 570 | 570 | 570 | 570 | 549 | 530 | 510 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (58) | (58) | (58) | (58) | (58) | (56) | (54) | (52) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 304 | 304 | 304 | 304 | 255 | 226 | 206 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (32) | (31) | (31) | (31) | (31) | (26) | (23) | (21) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 7 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Поковки диаметром до 300 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 590 (60) | 590 (60) | 590 (60) | 590 (60) | 590 (60) | 569 (58) | 549 (56) | 530 (54) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 345 (35) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 284 (29) | 245 (25) | 226 (23) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 7 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | — | — | — | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 615 (63) | 615 (63) | 615 (63) | 615 (63) | 615 (63) | 598 (61) | 579 (59) | 559 (57) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 333 (34) | 294 (30) | 275 (28) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 7 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | — | — | — | — | — |
| 20Х | Прутки и полосы диаметром или толщиной до 80 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 785 (80) | 755 (77) | 755 (77) | 745 (76) | 735 (75) | 715 (73) | 676 (69) | 649 (66) | 578 (59) | 540 (55) | 471 (48) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 638 (65) | 589 (60) | 589 (60) | 568 (58) | 559 (57) | 529 (54) | 510 (52) | 490 (50) | 461 (47) | 441 (45) | 432 (44) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 12 | 9 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 40 | 40 | 42 | 42 | 46 | — | — |
| | То же, от 80 до 150 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 785 (80) | 755 (77) | 726 (74) | 726 (74) | 726 (74) | 726 (74) | 726 (74) | 687 (70) | 608 (62) | 540 (55) | 471 (48) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 638 (65) | 589 (60) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 530 (54) | 530 (54) | 520 (53) | 491 (50) | 461 (47) | 432 (44) | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 10 | 10 | 11 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 33 | 31 | 31 | 30 | 32 | 35 | 37 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, от 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 785 (80) | 755 (77) | 726 (74) | 726 (74) | 726 (74) | 726 (74) | 726 (74) | 687 (70) | 608 (62) | 540 (55) | 471 (48) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 638 (65) | 589 (60) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 530 (54) | 530 (54) | 520 (53) | 491 (50) | 461 (47) | 432 (44) | — | — |
| | | $A$, % | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 26 | 25 | 28 | 30 | 31 | 31 | 34 | 34 | — | — |
| | Поковки диаметром до 500 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 390 (40) | 373 (38) | 363 (37) | 363 (37) | 363 (37) | 363 (37) | 363 (37) | 333 (34) | 304 (31) | 265 (27) | 235 (24) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 195 (20) | 177 (18) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 157 (16) | 147 (15) | 137 (14) | 128 (13) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 19 | 18 | 18 | 18 | 19 | 20 | 20 | 20 | 22 | 24 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 42 | 40 | 40 | 38 | 41 | 45 | 48 | 51 | 51 | 51 | — | — |
| | Поковки диаметром до 300 мм, | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 430 (44) | 412 (42) | 402 (41) | 402 (41) | 402 (41) | 402 (41) | 402 (41) | 373 (38) | 333 (34) | 294 (30) | 255 (26) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 215 | 196 | 196 | 196 | 196 | 196 | 196 | 177 | 167 | 157 | 147 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 20Х | КП215* | (кгс/мм²) | (22) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (18) | (17) | (16) | (15) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 18 | 16 | 16 | 16 | 18 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 42 | 40 | 40 | 38 | 41 | 45 | 48 | 51 | 51 | 51 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 451 | 432 | 432 | 432 | 432 | 412 | 402 | 363 | 323 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (48) | (46) | (44) | (44) | (44) | (44) | (42) | (41) | (37) | (33) | (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 226 | 206 | 206 | 206 | 206 | 206 | 196 | 196 | 177 | 167 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (23) | (21) | (21) | (21) | (21) | (21) | (20) | (20) | (18) | (17) | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 19 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 39 | 37 | 37 | 35 | 39 | 42 | 44 | 48 | 48 | 48 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП275* | $R_m^T$, МПа | 530 | 500 | 491 | 491 | 491 | 491 | 491 | 461 | 412 | 353 | 323 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (54) | (51) | (50) | (50) | (50) | (50) | (50) | (47) | (42) | (36) | (33) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 245 | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 216 | 206 | 196 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (28) | (25) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (22) | (21) | (20) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 16 | 15 | 15 | 15 | 18 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 35 | 34 | 34 | 32 | 34 | 38 | 41 | 43 | 43 | 43 | — | — |
| | То же, от 100 до 300 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 540 | 520 | 520 | 520 | 520 | 520 | 491 | 441 | 373 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (58) | (55) | (53) | (53) | (53) | (53) | (53) | (50) | (45) | (38) | (35) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 275 | 265 | 265 | 265 | 265 | 265 | 245 | 235 | 226 | 196 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (32) | (28) | (27) | (27) | (27) | (27) | (27) | (25) | (24) | (23) | (20) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 32 | 31 | 31 | 29 | 31 | 35 | 35 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| | Поковки диаметром от 100 до 300 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа | 590 | 559 | 540 | 540 | 540 | 540 | 540 | 500 | 451 | 383 | 353 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (57) | (55) | (55) | (55) | (55) | (55) | (51) | (46) | (39) | (36) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 345 | 294 | 284 | 284 | 284 | 284 | 284 | 265 | 255 | 245 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (35) | (30) | (29) | (29) | (29) | (29) | (29) | (27) | (26) | (25) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 14 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 32 | 31 | 31 | 29 | 31 | 35 | 35 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| 30Х | Прутки, полосы диамет- | $R_m^T$, МПа | 883 | 872 | 862 | 843 | 833 | 813 | 774 | 735 | 657 | 608 | 530 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (90) | (89) | (88) | (86) | (85) | (83) | (79) | (75) | (67) | (62) | (54) | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ром или толщиной до 80 мм | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 687 (70) | 638 (65) | 627 (64) | 608 (62) | 598 (61) | 578 (59) | 559 (57) | 529 (54) | 490 (50) | 490 (50) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 43 | 42 | 42 | 42 | 42 | 45 | 45 | 49 | 49 | 51 | — | — |
| | То же, более 80 до 150 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 883 (90) | 844 (86) | 814 (83) | 814 (83) | 785 (80) | 755 (77) | 726 (74) | 706 (72) | 687 (70) | 608 (62) | 530 (54) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 687 (70) | 638 (65) | 598 (61) | 589 (60) | 589 (60) | 589 (60) | 578 (59) | 568 (58) | 530 (54) | 491 (50) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 12 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 38 | 36 | 36 | 36 | 37 | 40 | 42 | 44 | 45 | 45 | — | — |
| | То же, более 150 до 250 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 883 (90) | 844 (86) | 814 (83) | 814 (83) | 785 (80) | 755 (77) | 726 (74) | 706 (72) | 687 (70) | 608 (62) | 530 (54) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 687 (70) | 638 (65) | 598 (61) | 589 (60) | 589 (60) | 589 (60) | 589 (60) | 569 (58) | 530 (54) | 491 (50) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 36 | 33 | 32 | 31 | 31 | 33И | 35 | 37 | 39 | 40 | 40 | — | — |
| | Поковки толщиной до 100 мм, КП395* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 615 (63) | 589 (60) | 569 (58) | 569 (58) | 549 (56) | 530 (54) | 510 (52) | 491 (50) | 481 (49) | 422 (43) | 373 (38) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 395 (40) | 363 (37) | 343 (35) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 323 (33) | 323 (33) | 304 (31) | 284 (29) | 265 (27) | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 18 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | — | — |
| 35Х | | $Z$, % | 45 | 43 | 41 | 40 | 40 | 42 | 45 | 47 | 50 | 51 | 51 | — | — |
| | Поковки диаметром до 100 мм, КП275* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 530 (54) | 520 (53) | 520 (53) | 510 (52) | 510 (52) | 510 (52) | 510 (52) | 451 (46) | 334 (34) | 334 (34) | 275 (28) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 275 (28) | 265 (27) | 265 (27) | 255 (26) | 245 (25) | 245 (25) | 226 (23) | 216 (22) | 216 (22) | 177 (18) | 157 (16) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 21 | 21 | 25 | 25 | 25 | 27 | 27 | 27 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 38 | 36 | 33 | 33 | 35 | 40 | 44 | 50 | 53 | 53 | — | — |
| | То же, от 300 до 500 и от 500 до 800 мм, КП275* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 530 (54) | 520 (53) | 520 (53) | 510 (52) | 510 (52) | 510 (52) | 510 (52) | 451 (46) | 334 (34) | 334 (34) | 275 (28) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 275 (28) | 265 (27) | 265 (27) | 255 (26) | 245 (25) | 245 (25) | 226 (23) | 216 (22) | 216 (22) | 177 (18) | 157 (16) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП315* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 570 (58) | 559 (57) | 559 (57) | 549 (56) | 549 (56) | 549 (56) | 549 (56) | 481 (49) | 353 (36) | 358 (36) | 294 (30) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 315 (32) | 304 (31) | 304 (31) | 294 (30) | 284 (29) | 284 (29) | 255 (26) | 245 (25) | 245 (25) | 206 (21) | 177 (18) | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 35Х | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа | 590 | 590 | 590 | 559 | 559 | 559 | 559 | 500 | 373 | 373 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (60) | (57) | (57) | (57) | (57) | (51) | (38) | (38) | (31) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 345 | 333 | 333 | 323 | 304 | 294 | 294 | 275 | 265 | 226 | 196 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (35) | (34) | (34) | (33) | (31) | (30) | (30) | (28) | (27) | (23) | (20) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | Поковки диаметром до 300 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа | 615 | 608 | 608 | 589 | 589 | 589 | 589 | 520 | 392 | 392 | 323 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (63) | (62) | (62) | (60) | (60) | (60) | (60) | (53) | (40) | (40) | (33) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 395 | 395 | 373 | 363 | 353 | 343 | 333 | 314 | 304 | 265 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (40) | (38) | (37) | (36) | (35) | (34) | (32) | (31) | (27) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа | 635 | 628 | 628 | 608 | 608 | 608 | 608 | 540 | 402 | 402 | 333 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (65) | (64) | (64) | (62) | (62) | (62) | (62) | (55) | (41) | (41) | (34) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 440 | 432 | 422 | 412 | 392 | 392 | 373 | 353 | 343 | 294 | 245 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (43) | (42) | (40) | (40) | (38) | (36) | (35) | (30) | (25) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, до 50 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 655 | 647 | 647 | 628 | 628 | 628 | 628 | 559 | 412 | 412 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (67) | (66) | (66) | (64) | (64) | (64) | (64) | (57) | (42) | (42) | (35) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 481 | 471 | 461 | 432 | 432 | 412 | 392 | 383 | 323 | 275 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (49) | (48) | (47) | (44) | (44) | (42) | (40) | (39) | (33) | (28) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, до 50 мм, КП540* | $R_m^T$, МПа | 685 | 677 | 677 | 657 | 657 | 657 | 657 | 579 | 510 | 432 | 353 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (69) | (69) | (67) | (67) | (67) | (67) | (59) | (52) | (44) | (36) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 540 | 530 | 520 | 510 | 471 | 471 | 451 | 432 | 422 | 353 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (54) | (53) | (52) | (48) | (48) | (46) | (44) | (43) | (36) | (31) | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40Х | Заготовки крепежных деталей толщиной до 300 мм, КП590* | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 25 | 26 | 30 | 33 | 37 | 40 | 40 | — | — |
| | | $R_m^T$, МПа | 736 | 726 | 726 | 706 | 706 | 706 | 706 | 628 | 510 | 510 | 383 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (75) | (74) | (74) | (72) | (72) | (72) | (72) | (64) | (52) | (52) | (39) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 579 | 569 | 549 | 520 | 520 | 491 | 471 | 461 | 392 | 333 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (59) | (58) | (56) | (53) | (53) | (50) | (48) | (47) | (40) | (34) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 14 | 14 | 16 | 16 | 16 | 18 | 18 | 18 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 38 | 36 | 33 | 30 | 35 | 40 | 44 | 50 | 53 | 53 | — | — |
| | Прутки и полосы диаметром или толщиной до 80 мм | $R_m^T$, МПа | 981 | 981 | 961 | 942 | 932 | 932 | 932 | 824 | 726 | 628 | 520 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (100) | (100) | (98) | (96) | (95) | (95) | (95) | (84) | (74) | (64) | (53) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 785 | 765 | 755 | 726 | 706 | 687 | 687 | 638 | 608 | 540 | 432 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (78) | (77) | (74) | (72) | (70) | (70) | (65) | (62) | (55) | (44) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 12 | 13 | 13 | 14 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 43 | 41 | 37 | 34 | 40 | 44 | 50 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| | То же, более 80 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 981 | 981 | 961 | 942 | 932 | 932 | 932 | 824 | 726 | 628 | 520 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (100) | (100) | (98) | (96) | (95) | (95) | (95) | (84) | (74) | (64) | (53) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 785 | 765 | 755 | 726 | 706 | 687 | 687 | 638 | 608 | 540 | 432 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (78) | (77) | (74) | (72) | (70) | (70) | (65) | (62) | (55) | (44) | — | — |
| | | $A$, % | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 38 | 36 | 33 | 30 | 36 | 39 | 44 | 49 | 49 | 49 | — | — |
| | То же, более 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа | 981 | 981 | 961 | 942 | 932 | 932 | 932 | 824 | 726 | 628 | 520 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (100) | (100) | (98) | (96) | (95) | (95) | (95) | (84) | (74) | (64) | (53) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 785 | 765 | 755 | 726 | 706 | 687 | 687 | 638 | 608 | 540 | 432 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (78) | (77) | (74) | (72) | (70) | (70) | (65) | (62) | (55) | (44) | — | — |
| | | $A$, % | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 33 | 32 | 29 | 26 | 31 | 34 | 39 | 43 | 43 | 43 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей диаметром до 300 мм, КП590* | $R_m^T$, МПа | 736 | 726 | 726 | 706 | 697 | 697 | 697 | 628 | 540 | 461 | 461 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (75) | (74) | (74) | (72) | (71) | (71) | (71) | (64) | (55) | (47) | (47) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 569 | 569 | 549 | 530 | 500 | 500 | 441 | 421 | 392 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (58) | (58) | (56) | (54) | (51) | (51) | (45) | (43) | (40) | (31) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 14 | 14 | 15 | 16 | 16 | 17 | 17 | 17 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 37 | 36 | 33 | 31 | 35 | 40 | 44 | 49 | 54 | 54 | — | — |
| | Поковки диаметром или толщиной от 500 до 800 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 461 | 461 | 451 | 441 | 441 | 441 | 392 | 343 | 304 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (48) | (47) | (47) | (46) | (45) | (45) | (45) | (40) | (35) | (31) | (31) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 235 | 235 | 226 | 226 | 216 | 216 | 196 | 186 | 167 | 137 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (25) | (24) | (24) | (23) | (23) | (22) | (22) | (20) | (19) | (17) | (14) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 18 | 19 | 19 | 20 | 20 | 20 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 40Х | То же, от 300 до 800 мм, КП275* | $R_m^T$, МПа | 530 | 520 | 520 | 510 | 500 | 500 | 500 | 451 | 392 | 334 | 334 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (54) | (53) | (53) | (52) | (51) | (51) | (51) | (46) | (40) | (34) | (34) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 265 | 265 | 255 | 245 | 235 | 235 | 236 | 216 | 196 | 157 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (28) | (27) | (27) | (26) | (25) | (24) | (24) | (23) | (22) | (20) | (16) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 14 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |
| | То же, до 800 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 559 | 559 | 549 | 540 | 540 | 540 | 481 | 422 | 363 | 363 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (58) | (57) | (57) | (56) | (55) | (55) | (55) | (49) | (43) | (37) | (37) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 304 | 304 | 294 | 284 | 275 | 275 | 255 | 245 | 216 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (32) | (31) | (31) | (30) | (29) | (28) | (28) | (26) | (25) | (22) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |
| | Поковки диаметром до 500 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа | 590 | 590 | 590 | 569 | 559 | 559 | 559 | 491 | 432 | 373 | 314 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (60) | (60) | (58) | (57) | (57) | (57) | (50) | (44) | (38) | (32) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 345 | 334 | 333 | 314 | 304 | 304 | 294 | 275 | 265 | 235 | 196 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (35) | (34) | (34) | (32) | (31) | (31) | (30) | (28) | (27) | (24) | (20) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |
| | То же, до 500 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа | 615 | 608 | 608 | 589 | 589 | 589 | 589 | 520 | 462 | 343 | 275 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (63) | (62) | (62) | (60) | (60) | (60) | (60) | (53) | (47) | (35) | (28) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 395 | 395 | 373 | 363 | 353 | 343 | 333 | 314 | 304 | 265 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (38) | (37) | (36) | (35) | (34) | (32) | (31) | (27) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа | 635 | 628 | 628 | 608 | 608 | 608 | 608 | 540 | 471 | 412 | 334 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (64) | (64) | (62) | (62) | (62) | (62) | (55) | (48) | (42) | (34) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 440 | 432 | 422 | 412 | 392 | 392 | 392 | 363 | 343 | 304 | 245 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (45) | (44) | (43) | (42) | (40) | (40) | (40) | (37) | (35) | (31) | (25) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |
| | Поковки диаметром до 300 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 655 | 647 | 647 | 628 | 628 | 628 | 628 | 549 | 491 | 422 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (67) | (66) | (66) | (64) | (64) | (64) | (64) | (56) | (50) | (43) | (35) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 471 | 451 | 441 | 432 | 422 | 402 | 392 | 334 | 265 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (50) | (48) | (46) | (45) | (44) | (43) | (41) | (40) | (34) | (27) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 26 | 30 | 33 | 37 | 41 | 41 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП540* | $R_m^T$, МПа | 685 | 687 | 677 | 657 | 647 | 647 | 647 | 589 | 510 | 441 | 363 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (70) | (69) | (67) | (66) | (66) | (66) | (60) | (52) | (45) | (37) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 540 | 530 | 520 | 500 | 491 | 471 | 461 | 441 | 422 | 373 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (54) | (53) | (51) | (50) | (48) | (47) | (45) | (43) | (38) | (30) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 42 | 40 | 37 | 34 | 39 | 45 | 49 | 55 | 61 | 61 | — | — |
| 45Х | Поковки диаметром до 100 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 559 | 559 | 540 | 540 | 540 | 540 | 481 | 363 | 363 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (58) | (57) | (57) | (55) | (55) | (55) | (55) | (49) | (37) | (37) | (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 304 | 294 | 294 | 284 | 275 | 265 | 255 | 245 | 216 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (32) | (31) | (30) | (30) | (29) | (28) | (27) | (26) | (25) | (22) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 17 | 17 | 19 | 19 | 20 | 22 | 22 | 23 | 23 | 23 | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 34 | 34 | 32 | 28 | 34 | 38 | 42 | 38 | 51 | 55 | — | — |
| | То же, от 300 до 800 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 559 | 559 | 540 | 540 | 540 | 540 | 481 | 363 | 363 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (58) | (57) | (57) | (55) | (55) | (55) | (55) | (49) | (37) | (37) | (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 304 | 294 | 294 | 284 | 275 | 265 | 256 | 245 | 216 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (32) | (31) | (30) | (30) | (29) | (28) | (27) | (26) | (25) | (22) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | Поковки диаметром до 800 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа | 590 | 579 | 579 | 559 | 559 | 559 | 559 | 491 | 373 | 373 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (59) | (59) | (57) | (57) | (57) | (57) | (50) | (38) | (38) | (31) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 345 | 334 | 324 | 314 | 304 | 304 | 294 | 275 | 265 | 235 | 186 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (35) | (34) | (33) | (32) | (31) | (31) | (30) | (28) | (27) | (24) | (19) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | То же, от 100 до 500 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа | 615 | 608 | 608 | 589 | 589 | 589 | 589 | 520 | 392 | 392 | 324 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (63) | (62) | (62) | (60) | (60) | (60) | (60) | (53) | (40) | (40) | (33) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 395 | 383 | 373 | 363 | 353 | 343 | 333 | 314 | 304 | 265 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (39) | (38) | (37) | (36) | (35) | (34) | (32) | (31) | (27) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | То же, от | $R_m^T$, МПа | 635 | 628 | 628 | 608 | 608 | 608 | 608 | 540 | 402 | 402 | 334 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 45Х | 100 до 500 мм, КП440* | (кгс/мм²) | (65) | (64) | (64) | (62) | (62) | (62) | (62) | (55) | (41) | (41) | (34) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 440 | 432 | 422 | 412 | 392 | 392 | 373 | 353 | 343 | 294 | 245 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (45) | (44) | (43) | (42) | (40) | (40) | (38) | (36) | (35) | (30) | (25) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП490* | $R^T_m$, МПа | 650 | 647 | 647 | 618 | 618 | 618 | 618 | 559 | 422 | 422 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (67) | (66) | (66) | (63) | (63) | (63) | (63) | (57) | (43) | (43) | (35) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 490 | 471 | 461 | 461 | 441 | 432 | 412 | 402 | 383 | 333 | 275 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (48) | (47) | (47) | (45) | (44) | (42) | (41) | (39) | (34) | (28) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | Поковки диаметром от 100 до 300 мм, КП540* | $R^T_m$, МПа | 685 | 677 | 677 | 647 | 647 | 647 | 647 | 559 | 441 | 441 | 353 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (69) | (69) | (66) | (66) | (66) | (66) | (57) | (45) | (45) | (36) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 540 | 520 | 510 | 510 | 491 | 471 | 451 | 441 | 422 | 373 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (53) | (52) | (52) | (50) | (48) | (46) | (45) | (43) | (38) | (31) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП590* | $R^T_m$, МПа | 735 | 716 | 716 | 697 | 697 | 697 | 697 | 618 | 471 | 471 | 383 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (73) | (71) | (71) | (71) | (71) | (63) | (48) | (48) | (39) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 590 | 569 | 549 | 549 | 530 | 520 | 500 | 481 | 461 | 402 | 333 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (58) | (56) | (56) | (54) | (53) | (51) | (49) | (47) | (41) | (34) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 40 | 43 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП640* | $R^T_m$, МПа | 785 | 765 | 765 | 746 | 746 | 746 | 746 | 647 | 491 | 491 | 402 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (80) | (78) | (78) | (76) | (76) | (76) | (76) | (66) | (50) | (50) | (41) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 640 | 618 | 598 | 579 | 569 | 569 | 549 | 510 | 491 | 441 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (63) | (61) | (59) | (58) | (58) | (56) | (52) | (50) | (45) | (35) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 27 | 27 | 25 | 22 | 27 | 30 | 33 | 30 | 43 | 43 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Прутки и полосы диаметром или толщиной до 80 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 1030 (105) | 1000 (102) | 1000 (102) | 981 (100) | 981 (100) | 981 (100) | 981 (100) | 844 (86) | 638 (65) | 638 (65) | 530 (54) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 804 (82) | 785 (80) | 755 (77) | 746 (76) | 746 (76) | 716 (73) | 667 (68) | 638 (65) | 579 (59) | 451 (46) | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 40 | 40 | 37 | 33 | 40 | 45 | 49 | 45 | 60 | 64 | — | — |
| | Прутки и полосы диаметром или толщиной более 80 до 150 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 1030 (105) | 1000 (102) | 1000 (102) | 981 (100) | 981 (100) | 981 (100) | 981 (100) | 844 (86) | 638 (65) | 638 (65) | 530 (54) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 804 (82) | 785 (80) | 755 (77) | 746 (76) | 746 (76) | 716 (73) | 667 (68) | 638 (65) | 579 (59) | 451 (46) | — | — |
| | | $A$, % | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 36 | 36 | 33 | 29 | 36 | 40 | 44 | 40 | 53 | 57 | — | — |
| | То же, более 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 1030 (105) | 1000 (102) | 1000 (102) | 981 (100) | 981 (100) | 981 (100) | 981 (100) | 844 (86) | 638 (65) | 638 (65) | 530 (54) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 804 (82) | 785 (80) | 755 (77) | 746 (76) | 746 (76) | 716 (73) | 667 (68) | 638 (65) | 579 (59) | 451 (46) | — | — |
| | | $A$, % | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 31 | 31 | 29 | 26 | 31 | 35 | 38 | 35 | 47 | 50 | — | — |
| 12ХМ | Листы толщиной от 4 до 6 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 441 (45) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 402 (41) | 373 (38) | 333 (34) | 294 (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 235 (24) | 235 (24) | 235 (24) | 235 (24) | 226 (23) | 226 (23) | 226 (23) | 206 (21) | 196 (20) | 186 (19) | 177 (18) | — | — |
| | | $A$, % | 22 | 21 | 21 | 19 | 18 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| | То же, от 60 до 130 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 441 (45) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 432 (44) | 402 (41) | 373 (38) | 333 (34) | 294 (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 235 (24) | 235 (24) | 235 (24) | 235 (24) | 226 (23) | 226 (23) | 216 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 147 (15) | 177 (18) | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 17 | 15 | 15 | 13 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 33 | 33 | 31 | 29 | 29 | 28 | 28 | 31 | 31 | 31 | — | — |
| 15ХМ | Трубы бесшовные горячекатаные наружным диаметром от 10 до 465 мм, с толщиной стенки от 2 до | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 441 (45) | 441 (45) | 431 (44) | 431 (44) | 421 (43) | 421 (43) | 412 (42) | 392 (40) | 372 (38) | 343 (35) | 294 (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 226 (23) | 226 (23) | 226 (23) | 226 (23) | 226 (23) | 226 (23) | 216 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 191 (19,5) | 186 (19) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 18 | 18 | 17 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 50 | 50 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 15ХМ | 32 мм | | | | | | | | | | | | | | |
| | Поковки толщиной или диаметром от 100 до 300 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа | 390 | 390 | 390 | 383 | 383 | 373 | 363 | 363 | 363 | 353 | 314 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (40) | (39) | (39) | (38) | (37) | (37) | (37) | (36) | (32) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 195 | 195 | 195 | 195 | 195 | 195 | 186 | 177 | 167 | 137 | 127 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (19) | (18) | (17) | (14) | (13) | — | — |
| | | $A$, % | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 | 20 | 18 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 55 | 55 | — | — |
| | То же, от 100 до 300 мм, КП215* | $R_m^T$, МПа | 430 | 430 | 430 | 422 | 422 | 412 | 402 | 402 | 402 | 392 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (44) | (44) | (44) | (43) | (43) | (42) | (41) | (41) | (41) | (40) | (35) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 215 | 215 | 215 | 215 | 215 | 215 | 206 | 196 | 186 | 147 | 147 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (22) | (22) | (22) | (22) | (22) | (22) | (21) | (20) | (19) | (15) | (15) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 18 | 18 | 17 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 53 | 53 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 470 | 470 | 461 | 461 | 451 | 441 | 441 | 441 | 432 | 373 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (48) | (48) | (48) | (47) | (47) | (46) | (45) | (45) | (45) | (44) | (38) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 245 | 245 | 245 | 245 | 245 | 235 | 226 | 216 | 167 | 167 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (25) | (25) | (25) | (25) | (25) | (24) | (23) | (22) | (17) | (17) | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 46 | 46 | — | — |
| | Поковки толщиной или диаметром до 500 мм, КП275* | $R_m^T$, МПа | 530 | 530 | 530 | 520 | 520 | 510 | 500 | 500 | 500 | 491 | 422 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (54) | (54) | (54) | (53) | (53) | (52) | (51) | (51) | (51) | (50) | (43) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 265 | 255 | 235 | 196 | 196 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (28) | (28) | (28) | (28) | (28) | (28) | (27) | (26) | (24) | (20) | (20) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 569 | 569 | 559 | 559 | 540 | 530 | 530 | 530 | 510 | 451 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (58) | (58) | (58) | (57) | (57) | (55) | (54) | (54) | (54) | (52) | (46) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 | 304 | 284 | 275 | 216 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (32) | (32) | (32) | (32) | (32) | (32) | (31) | (29) | (28) | (22) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 590 (60) | 589 (60) | 589 (60) | 579 (59) | 579 (59) | 559 (57) | 549 (56) | 549 (56) | 549 (56) | 530 (54) | 461 (47) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 345 (35) | 343 (35) | 343 (35) | 343 (35) | 343 (35) | 343 (35) | 323 (33) | 314 (32) | 294 (30) | 235 (24) | 235 (24) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 615 (63) | 615 (63) | 615 (63) | 608 (62) | 608 (62) | 589 (60) | 579 (59) | 579 (59) | 579 (59) | 559 (57) | 481 (49) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 373 (38) | 353 (36) | 343 (35) | 275 (28) | 275 (28) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | — | — |
| | Поковки толщиной или диаметром до 100 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 635 (65) | 635 (65) | 635 (65) | 628 (64) | 628 (64) | 608 (62) | 598 (61) | 598 (61) | 598 (61) | 579 (59) | 491 (50) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 440 (45) | 440 (45) | 440 (45) | 440 (45) | 440 (45) | 440 (45) | 422 (43) | 402 (41) | 383 (39) | 304 (31) | 304 (31) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 655 (67) | 655 (67) | 655 (67) | 647 (66) | 647 (66) | 628 (64) | 618 (63) | 618 (63) | 618 (63) | 598 (61) | 491 (50) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 490 (50) | 490 (50) | 490 (50) | 490 (50) | 490 (50) | 490 (50) | 471 (48) | 451 (46) | 422 (43) | 343 (35) | 343 (35) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | — | — |
| 20ХМ | Поковки толщиной до 100 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 590 (60) | 579 (59) | 579 (59) | 569 (58) | 569 (58) | 559 (57) | 559 (57) | 559 (57) | 559 (57) | 500 (51) | 461 (47) | 451 (46) | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 345 (35) | 345 (35) | 345 (35) | 345 (35) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 333 (34) | 304 (31) | 284 (29) | 265 (27) | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — |
| | | $Z$, % | 45 | 44 | 43 | 42 | 41 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — |
| | То же, до 50 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 615 (63) | 608 (62) | 608 (62) | 598 (61) | 598 (61) | 589 (60) | 589 (60) | 589 (60) | 589 (60) | 481 (49) | 471 (48) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 383 (39) | 383 (39) | 383 (39) | 383 (39) | 343 (35) | 323 (33) | 304 (31) | — | — |
| | | $A$, % | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 44 | 43 | 42 | 41 | 40 | 40 | 40 | 40 | 45 | 45 | — | — |
| | 20ХМА | Поковки и | $R_m^T$, МПа | 590 | 576 | 544 | 520 | 484 | 452 | 440 | 392 | 356 | 323 | 288 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 20ХМА | листы толщиной более 150 до 300 мм, КП345* | (кгс/мм²) | (60) | (59) | (56) | (53) | (49) | (46) | (45) | (40) | (36) | (33) | (29) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 345 | 345 | 339 | 333 | 323 | 316 | 304 | 294 | 294 | 268 | 248 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (35) | (35) | (34,5) | (34) | (33) | (32) | (31) | (30) | (30) | (27) | (25) | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 38 | 37 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 40 | — | — |
| | То же, до 150 мм, КП440* | $R^T_m$, МПа | 635 | 628 | 628 | 618 | 588 | 540 | 516 | 490 | 460 | 420 | 380 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (64) | (64) | (63) | (60) | (55) | (53) | (50) | (47) | (43) | (39) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 440 | 440 | 440 | 435 | 428 | 420 | 402 | 392 | 372 | 348 | 323 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (45) | (45) | (45) | (44) | (43,5) | (43) | (41) | (40) | (38) | (36) | (33) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 38 | 37 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 40 | — | — |
| 20ХМЛ | Отливки | $R^T_m$, МПа | 500 | 490 | 480 | 475 | 470 | 460 | 450 | 440 | 430 | 425 | 410 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (51) | (50) | (49) | (48,5) | (48) | (47) | (46) | (45) | (44) | (43) | (42) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 400 | 395 | 390 | 385 | 380 | 370 | 360 | 350 | 340 | 323 | 323 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (41) | (40,5) | (40) | (39) | (39) | (38) | (37) | (36) | (35) | (33) | (33) | — | |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | |
| | | $Z$, % | 27 | 28 | 30 | 32 | 35 | 40 | 52 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| 20ХМФЛ | Отливки | $R^T_m$, МПа | 491 | 491 | 491 | 491 | 491 | 485 | 480 | 480 | 461 | 452 | 400 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (50) | (50) | (50) | (49,5) | (49) | (49) | (47) | (46) | (41) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 314 | 314 | 314 | 314 | 290 | 280 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (32) | (32) | (32) | (32) | (30) | (29) | (28) | (28) | (28) | (28) | (28) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 18 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 28 | 28 | 32 | 33 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | — | — |
| | Прутки и полосы толщиной или диаметром до 80 мм | $R^T_m$, МПа | 932 | 903 | 893 | 863 | 853 | 824 | 814 | 736 | 736 | 736 | 638 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (95) | (92) | (91) | (88) | (87) | (84) | (83) | (75) | (75) | (75) | (65) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 736 | 736 | 706 | 687 | 677 | 657 | 647 | 628 | 598 | 559 | 510 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (75) | (75) | (72) | (70) | (69) | (67) | (66) | (64) | (61) | (57) | (52) | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30ХМА | То же, более 80 до 150 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 932 (95) | 903 (92) | 893 (91) | 863 (88) | 853 (87) | 824 (84) | 814 (83) | 736 (75) | 736 (75) | 736 (75) | 638 (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 736 (75) | 736 (75) | 706 (72) | 687 (70) | 677 (69) | 657 (67) | 647 (66) | 628 (64) | 598 (61) | 559 (57) | 510 (52) | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | — | — |
| | Прутки и полосы толщиной или диаметром более 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 932 (95) | 903 (92) | 893 (91) | 863 (88) | 853 (87) | 824 (84) | 814 (83) | 736 (75) | 736 (75) | 736 (75) | 638 (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 736 (75) | 736 (75) | 706 (72) | 687 (70) | 677 (69) | 651 (67) | 647 (66) | 628 (64) | 598 (61) | 559 (57) | 510 (52) | — | — |
| | | $A$, % | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | — | — |
| | Трубы наружным диаметром от 25 до 710 мм, с толщиной стенки от 2,5 до 50 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 589 (60) | 569 (58) | 559 (57) | 540 (55) | 530 (54) | 530 (54) | 530 (54) | 520 (53) | 510 (52) | 432 (44) | 402 (41) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | 343 (35) | 324 (33) | 324 (33) | 324 (33) | 314 (32) | 314 (32) | 294 (30) | 294 (30) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром до 100 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 540 (55) | 530 (54) | 471 (48) | 422 (43) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 395 (40) | 395 (40) | 373 (38) | 353 (36) | 323 (33) | 323 (33) | 323 (33) | 314 (32) | 314 (32) | 294 (30) | 275 (28) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром до 300 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 491 (50) | 482 (49) | 474 (48) | 467 (47) | 443 (45) | 435 (44) | 428 (43,5) | 428 (43,5) | 429 (43) | 374 (38) | 333 (34) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 440 (45) | 425 (43) | 415 (42) | 390 (40) | 365 (37) | 345 (35) | 323 (33) | 294 (30) | 275 (28) | 265 (27) | 255 (26) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром от 100 до 200 мм, | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 588 (60) | 578 (59) | 568 (58) | 559 (57) | 539 (55) | 529 (54) | 529 (54) | 519 (53) | 500 (51) | 461 (47) | 412 (42) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 490 (50) | 490 (50) | 461 (47) | 441 (45) | 402 (41) | 382 (39) | 367 (37) | 343 (35) | 323 (33) | 304 (31) | 294 (30) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 13 | 13 | 13 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 30ХМА | КП490* | | | | | | | | | | | | | | |
| | То же, до 100 мм | $R_m^T$, МПа | 736 | 716 | 716 | 687 | 676 | 667 | 657 | 647 | 638 | 559 | 500 | — | — |
| | КП590* | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (73) | (70) | (69) | (68) | (67) | (66) | (65) | (57) | (51) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 569 | 559 | 510 | 461 | 481 | 412 | 392 | 392 | 353 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (58) | (57) | (52) | (47) | (44) | (42) | (40) | (40) | (36) | (35) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | — | — |
| | То же, до 300 мм, | $R_m^T$, МПа | 785 | 775 | 755 | 746 | 706 | 697 | 687 | 687 | 669 | 598 | 530 | — | — |
| | КП640* | (кгс/мм²) | (80) | (79) | (77) | (76) | (72) | (71) | (70) | (70) | (68) | (61) | (54) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 640 | 617 | 608 | 568 | 529 | 480 | 461 | 441 | 441 | 412 | 382 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (63) | (62) | (58) | (54) | (49) | (47) | (45) | (45) | (42) | (39) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | — | — |
| | Прутки и полосы толщиной или диаметром до 80 мм | $R_m^T$, МПа | 932 | 912 | 903 | 873 | 844 | 844 | 824 | 824 | 804 | 706 | 638 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (95) | (93) | (92) | (89) | (86) | (85) | (84) | (84) | (82) | (72) | (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 736 | 716 | 697 | 657 | 608 | 608 | 598 | 598 | 598 | 559 | 520 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (71) | (67) | (62) | (62) | (61) | (61) | (61) | (57) | (53) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | — | — |
| | Прутки и полосы толщиной или диаметром более 80 мм до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 932 | 912 | 903 | 873 | 844 | 844 | 824 | 824 | 804 | 706 | 638 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (95) | (93) | (92) | (89) | (86) | (86) | (84) | (84) | (82) | (72) | (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 736 | 716 | 697 | 657 | 608 | 608 | 598 | 598 | 598 | 559 | 520 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (71) | (67) | (62) | (62) | (61) | (61) | (61) | (57) | (53) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | — | — |
| | То же, более 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа | 932 | 912 | 903 | 873 | 844 | 844 | 824 | 824 | 804 | 706 | 638 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (95) | (93) | (92) | (89) | (86) | (86) | (84) | (84) | (82) | (72) | (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 736 | 716 | 697 | 657 | 608 | 608 | 598 | 598 | 598 | 559 | 520 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (71) | (67) | (62) | (62) | (61) | (61) | (61) | (57) | (53) | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35ХМ | | $A$, % | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | — | — |
| | Поковки толщиной или диаметром от 300 до 800 мм, КП245* | $R_m^T$, МПа | 470 | 461 | 451 | 441 | 441 | 432 | 422 | 412 | 392 | 353 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (48) | (47) | (46) | (45) | (45) | (44) | (43) | (42) | (40) | (36) | (31) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 235 | 226 | 226 | 226 | 216 | 206 | 196 | 186 | 177 | 157 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (25) | (24) | (23) | (23) | (23) | (22) | (21) | (20) | (19) | (18) | (16) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | То же, от 300 до 800 мм, КП275* | $R_m^T$, МПа | 530 | 520 | 510 | 500 | 491 | 491 | 491 | 471 | 441 | 402 | 333 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (54) | (53) | (52) | (51) | (50) | (50) | (50) | (48) | (45) | (41) | (34) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 275 | 265 | 265 | 255 | 245 | 245 | 235 | 226 | 206 | 196 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (28) | (27) | (27) | (26) | (25) | (25) | (24) | (23) | (21) | (20) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | Поковки толщиной или диаметром до 800 мм, КП315* | $R_m^T$, МПа | 570 | 559 | 549 | 540 | 530 | 520 | 510 | 500 | 471 | 432 | 363 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (58) | (57) | (56) | (55) | (54) | (53) | (52) | (51) | (48) | (44) | (37) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 304 | 294 | 294 | 284 | 275 | 265 | 245 | 235 | 226 | 196 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (32) | (31) | (30) | (30) | (29) | (28) | (27) | (26) | (24) | (23) | (20) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | То же, до 800 мм, КП345* | $R_m^T$, МПа | 590 | 590 | 569 | 559 | 549 | 540 | 530 | 520 | 491 | 451 | 373 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (58) | (57) | (56) | (55) | (54) | (53) | (50) | (46) | (38) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 345 | 333 | 323 | 314 | 314 | 294 | 294 | 294 | 245 | 245 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (35) | (34) | (33) | (32) | (32) | (30) | (30) | (30) | (25) | (25) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | То же, от 50 до 800 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа | 615 | 608 | 596 | 589 | 589 | 569 | 559 | 549 | 510 | 471 | 392 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (63) | (62) | (61) | (60) | (60) | (58) | (57) | (56) | (52) | (48) | (40) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 395 | 395 | 373 | 363 | 353 | 343 | 333 | 323 | 294 | 294 | 245 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (40) | (38) | (37) | (36) | (35) | (34) | (33) | (30) | (30) | (25) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | То же, от 50 до 500 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа | 635 | 628 | 618 | 598 | 598 | 589 | 589 | 559 | 530 | 491 | 392 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (65) | (64) | (63) | (61) | (61) | (60) | (60) | (57) | (54) | (50) | (40) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 440 | 432 | 422 | 412 | 402 | 392 | 392 | 363 | 323 | 314 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (43) | (42) | (41) | (40) | (40) | (37) | (33) | (32) | (30) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 35ХМ | Поковки толщиной или диаметром до 300 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 657 | 647 | 638 | 628 | 608 | 598 | 589 | 579 | 540 | 500 | 422 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (67) | (66) | (65) | (64) | (62) | (61) | (60) | (59) | (55) | (51) | (43) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 471 | 461 | 461 | 441 | 432 | 412 | 402 | 363 | 353 | 304 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (48) | (47) | (47) | (45) | (44) | (42) | (41) | (37) | (36) | (31) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | То же, до 50 мм, КП540* | $R_m^T$, МПа | 685 | 685 | 667 | 647 | 638 | 628 | 618 | 608 | 569 | 530 | 432 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (70) | (68) | (66) | (65) | (64) | (63) | (62) | (58) | (54) | (44) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 540 | 520 | 510 | 500 | 491 | 471 | 461 | 441 | 392 | 392 | 343 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (53) | (52) | (51) | (50) | (48) | (47) | (45) | (40) | (40) | (35) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП590* | $R_m^T$, МПа | 735 | 726 | 716 | 697 | 687 | 687 | 667 | 647 | 608 | 569 | 461 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (75) | (74) | (73) | (71) | (70) | (70) | (68) | (66) | (62) | (58) | (47) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 569 | 559 | 549 | 530 | 520 | 491 | 491 | 432 | 422 | 373 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (58) | (57) | (56) | (54) | (53) | (50) | (50) | (44) | (43) | (38) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | — | — |
| | Прутки и полосы толщиной или диаметром до 80 мм | $R_m^T$, МПа | 932 | 912 | 903 | 883 | 883 | 853 | 844 | 824 | 785 | 716 | 589 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (95) | (93) | (92) | (90) | (90) | (87) | (86) | (84) | (80) | (73) | (60) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 834 | 814 | 795 | 785 | 755 | 736 | 716 | 687 | 618 | 598 | 530 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (85) | (83) | (81) | (80) | (77) | (75) | (73) | (70) | (63) | (61) | (54) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 46 | 46 | 46 | 47 | 47 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | — | — |
| | Прутки и полосы толщиной или диаметром более 80 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 932 | 912 | 903 | 883 | 883 | 853 | 844 | 824 | 785 | 716 | 589 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (95) | (93) | (92) | (90) | (90) | (87) | (86) | (84) | (80) | (73) | (60) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 834 | 814 | 795 | 785 | 755 | 736 | 716 | 687 | 618 | 598 | 530 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (85) | (83) | (81) | (80) | (77) | (75) | (73) | (70) | (63) | (61) | (54) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 41 | 41 | 41 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35ХМА | То же, более 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 932 (95) | 912 (93) | 903 (92) | 883 (90) | 883 (90) | 853 (87) | 844 (86) | 824 (84) | 785 (80) | 716 (73) | 589 (60) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 814 (83) | 795 (81) | 785 (80) | 755 (77) | 736 (75) | 716 (73) | 687 (70) | 618 (63) | 698 (61) | 530 (54) | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 36 | 36 | 36 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | 37 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром до 300 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 479 (49) | 469 (48) | 459 (47) | 459 (47) | 449 (46) | 439 (45) | 428 (44) | 408 (42) | 367 (37) | 316 (32) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 440 (45) | 423 (43) | 407 (41) | 407 (41) | 407 (41) | 389 (40) | 371 (38) | 353 (36) | 333 (34) | 319 (32) | 283 (29) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП640* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 784 (80) | 765 (78) | 749 (76) | 732 (75) | 732 (75) | 717 (73) | 701 (71) | 701 (71) | 651 (66) | 586 (60) | 505 (51) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 640 (65) | 611 (62) | 588 (60) | 588 (60) | 588 (60) | 562 (57) | 536 (55) | 500 (51) | 484 (49) | 460 (47) | 408 (42) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 38 | 39 | 39 | 39 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | — | — |
| | Поковки толщиной от 100 до 300 мм, КП440* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 635 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 598 (61) | 579 (59) | 569 (58) | 559 (57) | 530 (54) | 489 (49) | 412 (42) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 440 (45) | 422 (43) | 402 (41) | 402 (41) | 402 (41) | 392 (40) | 373 (38) | 353 (36) | 333 (34) | 314 (32) | 284 (29) | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром от 100 до 300 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 618 (63) | 598 (61) | 589 (60) | 579 (59) | 579 (59) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 510 (52) | 461 (47) | 402 (41) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 395 (40) | 373 (38) | 353 (36) | 353 (36) | 353 (36) | 353 (36) | 333 (34) | 314 (32) | 294 (30) | 275 (28) | 255 (26) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром от 100 до 200 мм, | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 598 (61) | 579 (59) | 569 (58) | 559 (57) | 530 (54) | 481 (49) | 412 (42) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 490 (50) | 471 (48) | 441 (45) | 441 (45) | 441 (45) | 432 (44) | 412 (42) | 392 (40) | 373 (38) | 343 (35) | 314 (32) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | 43 | 43 | 43 | 43 | 43 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 35ХМА | КП490* | $R^T_m$, МПа | 736 | 706 | 697 | 687 | 687 | 667 | 657 | 647 | 608 | 549 | 471 | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП590* | (кгс/мм²) | (75) | (72) | (71) | (70) | (70) | (68) | (67) | (66) | (62) | (56) | (48) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 590 | 559 | 530 | 530 | 530 | 520 | 491 | 471 | 441 | 422 | 383 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (57) | (54) | (54) | (54) | (53) | (50) | (48) | (45) | (43) | (39) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| | То же, до 300 мм, КП640* | $R^T_m$, МПа | 785 | 765 | 755 | 736 | 726 | 726 | 726 | 697 | 651 | 598 | 491 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (80) | (78) | (77) | (75) | (74) | (74) | (74) | (71) | (67) | (61) | (50) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 640 | 618 | 618 | 589 | 569 | 569 | 549 | 520 | 481 | 451 | 412 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (63) | (63) | (60) | (58) | (58) | (56) | (53) | (49) | (46) | (42) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 38 | 38 | 39 | 39 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| 10Х2М | Листы толщиной от 6 до 50 мм | $R^T_m$, МПа | 392 | 373 | 363 | 353 | 343 | 333 | 323 | 314 | 304 | 294 | 255 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (38) | (37) | (36) | (35) | (34) | (33) | (32) | (31) | (30) | (26) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 294 | 294 | 275 | 265 | 255 | 245 | 245 | 245 | 245 | 245 | 216 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (30) | (30) | (28) | (27) | (26) | (25) | (25) | (25) | (25) | (25) | (22) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 18 | 17 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 62 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | — | — |
| | То же, более 50 до 150 мм | $R^T_m$, МПа | 343 | 333 | 333 | 323 | 323 | 314 | 314 | 304 | 294 | 294 | 255 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (35) | (34) | (34) | (33) | (33) | (32) | (32) | (31) | (30) | (30) | (26) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 196 | 196 | 196 | 196 | 196 | 177 | 177 | 167 | 167 | 167 | 142 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (20) | (20) | (20) | (20) | (20) | (18) | (18) | (17) | (17) | (17) | (14,5) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 52 | 52 | 50 | 55 | — | — |
| | Бесшовные холоднокатаные трубы диаметром от | $R^T_m$, МПа | 392 | 392 | 363 | 353 | 343 | 333 | 323 | 314 | 304 | 294 | 255 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (37) | (36) | (35) | (34) | (33) | (32) | (31) | (30) | (26) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 235 | 226 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 206 | 176 | 142 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (24) | (23) | (22) | (22) | (22) | (22) | (22) | (21) | (18) | (14,5) | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 12 до 60 мм | $A$, % | 20 | 20 | 18 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 62 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | — | — |
| 12Х2М, 10Х2М | Поковки | $R_m^T$, МПа | 343 | 343 | 343 | 323 | 323 | 314 | 314 | 304 | 304 | 294 | 255 | — | — |
| | толщиной до | (кгс/мм$^2$) | (35) | (35) | (35) | (33) | (33) | (32) | (32) | (31) | (31) | (30) | (26) | — | — |
| | 400 мм | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 186 | 186 | 177 | 177 | 177 | 177 | 177 | 177 | 177 | 142 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (19) | (19) | (18) | (18) | (18) | (18) | (18) | (18) | (18) | (14,5) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 19 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 50 | 50 | — | — |
| 12МХ | Поковки | $R_m^T$, МПа | 441 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 402 | 373 | 333 | 294 | — | — |
| | толщиной от | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (41) | (38) | (34) | (30) | — | — |
| | 20 до 130 мм | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 216 | 206 | 206 | 196 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (22) | (21) | (21) | (20) | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 16 | 16 | 16 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 32 | 33 | 33 | 31 | 29 | 29 | 28 | 28 | 31 | 31 | 31 | — | — |
| | То же, до | $R_m^T$, МПа | 412 | 412 | 402 | 402 | 392 | 383 | 383 | 373 | 353 | 314 | 275 | — | — |
| | 25 мм; прут- | (кгс/мм$^2$) | (42) | (42) | (41) | (41) | (40) | (39) | (39) | (38) | (36) | (32) | (28) | — | — |
| | ки, полосы | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 235 | 216 | 206 | 206 | 196 | — | — |
| | толщиной или | (кгс/мм$^2$) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (24) | (22) | (21) | (21) | (20) | — | — |
| | диаметром до | $A$, % | 21 | 20 | 20 | 18 | 17 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |
| | 90 мм | $Z$, % | 45 | 44 | 43 | 42 | 41 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| | Прутки, по- | $R_m^T$, МПа | 412 | 412 | 402 | 402 | 392 | 383 | 383 | 373 | 353 | 314 | 275 | — | — |
| | лосы толщи- | (кгс/мм$^2$) | (42) | (42) | (41) | (41) | (40) | (39) | (39) | (38) | (36) | (32) | (28) | — | — |
| | ной или диа- | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 235 | 235 | 235 | 226 | 226 | 216 | 206 | 196 | 186 | 177 | — | — |
| | метром более | (кгс/мм$^2$) | (24) | (24) | (24) | (24) | (23) | (23) | (22) | (21) | (20) | (19) | (18) | — | — |
| | 90 до 150 мм | $A$, % | 19 | 18 | 18 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 38 | 37 | 36 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — | — |
| | То же, бо- | $R_m^T$, МПа | 412 | 412 | 402 | 402 | 392 | 383 | 383 | 373 | 353 | 314 | 275 | — | — |
| | лее 150 до | (кгс/мм$^2$) | (42) | (42) | (41) | (41) | (40) | (39) | (39) | (38) | (36) | (32) | (28) | — | — |
| | 200 мм | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 235 | 235 | 235 | 226 | 226 | 216 | 206 | 196 | 186 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (24) | (24) | (24) | (24) | (23) | (23) | (22) | (21) | (20) | (19) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 17 | 15 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 34 | 33 | 33 | 32 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | — | — |
| | Листы тол- | $R_m^T$, МПа | 441 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 402 | 373 | 333 | 294 | — | — |
| | щиной от 4 до | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (41) | (38) | (34) | (30) | — | — |
| | 6 мм | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 235 | 235 | 235 | 226 | 226 | 216 | 206 | 196 | 186 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (24) | (24) | (24) | (24) | (23) | (23) | (22) | (21) | (20) | (19) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 24 | 23 | 23 | 21 | 20 | 17 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 12МХ | | $Z$, % | 51 | 52 | 52 | 50 | 46 | 46 | 45 | 45 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, от 20 до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 441 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 402 | 373 | 333 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (41) | (38) | (34) | (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 235 | 235 | 235 | 226 | 226 | 216 | 206 | 196 | 186 | 177 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (24) | (24) | (24) | (24) | (23) | (23) | (22) | (21) | (20) | (19) | (18) | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 17 | 17 | 17 | 16 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 36 | 36 | 34 | 32 | 32 | 30 | 30 | 34 | 34 | 34 | — | — |
| 30ХГСА | Поковки диаметром от 50 до 100 мм КП440* | $R_m^T$, МПа | 635 | 628 | 608 | 598 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (65) | (64) | (62) | (61) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 440 | 440 | 422 | 402 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (45) | (43) | (41) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 16 | 16 | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 44 | 43 | 42 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром до 300 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 655 | 647 | 628 | 618 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (67) | (66) | (64) | (63) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 471 | 451 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (50) | (48) | (46) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 13 | 13 | 11 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 39 | 38 | 37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП540* | $R_m^T$, МПа | 685 | 677 | 657 | 647 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (69) | (67) | (66) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 540 | 540 | 510 | 500 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (55) | (52) | (51) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 13 | 13 | 11 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 39 | 38 | 37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | То же, до 100 мм, КП590* | $R_m^T$, МПа | 735 | 726 | 706 | 697 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | (кгс/мм$^2$) | (75) | (74) | (72) | (71) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 590 | 559 | 540 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (57) | (55) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 11 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 39 | 38 | 37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | То же, до 100 мм, КП640* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 785 (80) | 765 (78) | 755 (77) | 746 (76) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 640 (65) | 640 (65) | 608 (62) | 589 (60) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 11 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 39 | 39 | 37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Поковки диаметром до 100 мм, КП685* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 835 (85) | 824 (84) | 795 (81) | 785 (80) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 685 (70) | 685 (70) | 657 (67) | 628 (64) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 11 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 39 | 37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Штамповки, прутки и полосы диаметром или толщиной до 80 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 1080 (110) | 1060 (108) | 1020 (104) | 1010 (103) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 834 (85) | 795 (81) | 755 (77) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 9 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 44 | 43 | 42 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | То же, более 80 до 150 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 1080 (110) | 1060 (108) | 1020 (104) | 1010 (103) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 834 (85) | 795 (81) | 755 (77) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 8 | 8 | 8 | 7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 39 | 38 | 37 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | То же, более 150 до 250 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 1080 (110) | 1060 (108) | 1020 (104) | 1010 (103) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 834 (85) | 795 (81) | 755 (77) | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 7 | 7 | 7 | 6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 34 | 33 | 33 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10ХСНД | Холоднокатаные, горячекатаные трубы наружным $\varnothing = 60 \div 168$ мм, с толщиной стенки 6—11 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 461 (47) | 441 (45) | 432 (44) | 422 (43) | 422 (43) | 422 (43) | 422 (43) | 422 (43) | 412 (42) | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 314 (32) | 294 (30) | 275 (28) | 255 (26) | 245 (25) | 245 (25) | 245 (25) | 226 (23) | 206 (20) | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 14 | 13 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 41 | 41 | 41 | 41 | 38 | 35 | 35 | 35 | — | — | — | — |
| | Фасонные профили се- | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 530 (54) | 510 (52) | 500 (51) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| | чением от 5 до 250 мм | $R^T_{p0,2}$, МПа | 392 | 373 | 353 | 333 | 323 | 323 | 323 | 323 | 275 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (38) | (36) | (34) | (33) | (33) | (33) | (33) | (28) | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 48 | 47 | 45 | 44 | 41 | 38 | 38 | 37 | — | — | — | — |
| | Прокат, толстолистовая сталь толщиной от 4 до 40 мм | $R^T_m$, МПа | 510 | 500 | 481 | 471 | 471 | 471 | 471 | 471 | 461 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (52) | (51) | (49) | (48) | (48) | (48) | (48) | (48) | (47) | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 392 | 373 | 353 | 323 | 314 | 314 | 314 | 314 | 284 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (38) | (36) | (33) | (32) | (32) | (32) | (32) | (29) | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 16 | 15 | 16 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 39 | 38 | 38 | 38 | 36 | 35 | 32 | 32 | 32 | — | — | — | — |
| 10ХН1М | Лист толщиной от 6 до 40 мм | $R^T_m$, МПа | 540 | 530 | 520 | 500 | 491 | 491 | 461 | 451 | 441 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (54) | (53) | (51) | (50) | (50) | (47) | (46) | (45) | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 441 | 432 | 422 | 412 | 402 | 392 | 373 | 363 | 353 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (45) | (44) | (43) | (42) | (41) | (40) | (38) | (37) | (36) | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 16 | 16 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 14 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — |
| | Трубы бесшовные горячедеформированные наружным $\varnothing = 60 \div 168$ мм, с толщиной стенки от 6 до 32 мм | $R^T_m$, МПа | 491 | 491 | 471 | 451 | 441 | 432 | 412 | 402 | 392 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (48) | (46) | (45) | (44) | (42) | (41) | (40) | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 343 | 333 | 323 | 314 | 304 | 294 | 294 | 294 | 275 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (35) | (34) | (33) | (32) | (31) | (30) | (30) | (30) | (28) | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — |
| 16ГНМА | Листы | $R^T_m$, МПа | 491 | 491 | 491 | 491 | 471 | 471 | 471 | 461 | 451 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (50) | (50) | (48) | (48) | (48) | (47) | (46) | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 323 | 323 | 314 | 294 | 275 | 265 | 255 | 255 | 245 | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (33) | (33) | (32) | (30) | (28) | (27) | (26) | (26) | (25) | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | 16 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10ГН2МФА | Поковки, листы толщиной до 300 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 540 (55) | 520 (53) | 510 (52) | 510 (52) | 510 (52) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 343 (35) | 333 (34) | 323 (33) | 314 (32) | 304 (31) | 304 (31) | 304 (31) | 294 (30) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 54 | 53 | 53 | 52 | 51 | 50 | — | — | — | — | — |
| 10ГН2МФАЛ | Отливки | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 540 (55) | 530 (53) | 510 (52) | 510 (52) | 510 (52) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 343 (35) | 333 (34) | 323 (33) | 314 (32) | 304 (31) | 304 (31) | 304 (31) | 294 (30) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 38 | 37 | 36 | 35 | 35 | 35 | — | — | — | — | — |
| 12Х1МФ | Горячекатаная сталь толщиной или диаметром до 90 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 451 (46) | 451 (46) | 441 (45) | 441 (45) | 432 (44) | 422 (43) | 392 (40) | 392 (40) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 206 (21) | 206 (21) | 177 (18) | — | — |
| | | $A$, % | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| | То же, более 90 до 150 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 451 (46) | 451 (46) | 441 (45) | 441 (45) | 432 (44) | 422 (43) | 392 (40) | 392 (40) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 206 (21) | 206 (21) | 177 (18) | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, более 150 до 200 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 451 (46) | 451 (46) | 441 (45) | 441 (45) | 432 (44) | 422 (43) | 392 (40) | 392 (40) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 255 (26) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 206 (21) | 206 (21) | 177 (18) | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| | Поковки толщиной от 100 до 300 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 390 (40) | 383 (39) | 383 (39) | 373 (38) | 373 (38) | 363 (37) | 363 (37) | 353 (36) | 353 (36) | 323 (33) | 323 (33) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 195 (20) | 195 (20) | 195 (20) | 195 (20) | 195 (20) | 186 (19) | 177 (18) | 177 (18) | 157 (16) | 157 (16) | 137 (14) | — | — |
| | | $A$, % | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 | 18 | 18 | 17 | 17 | 17 | 17 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | Поковки толщиной до | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 430 (44) | 422 (43) | 422 (43) | 412 (42) | 412 (42) | 402 (41) | 402 (41) | 392 (40) | 392 (40) | 353 (36) | 353 (36) | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 12Х1МФ | 800 мм, КП215* | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 215 (22) | 215 (22) | 215 (22) | 215 (22) | 215 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 177 (18) | 177 (18) | 147 (15) | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — | — |
| | То же, от 100 до 500 мм КП245* | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 470 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 451 (46) | 451 (46) | 441 (45) | 441 (45) | 432 (44) | 422 (43) | 392 (40) | 392 (40) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 245 (25) | 245 (25) | 245 (25) | 245 (25) | 245 (25) | 235 (24) | 216 (22) | 216 (22) | 196 (20) | 196 (20) | 167 (17) | — | — |
| | | $A$, % | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — | — |
| | Трубы бесшовные горячекатаные $\varnothing = 57 \div 465$ мм, с толщиной стенки от 3,5 до 60 мм; холоднодеформируемые $\varnothing = 10 \div 108$ мм, с толщиной от 2 до 13 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 441 (45) | 432 (44) | 432 (44) | 422 (43) | 422 (43) | 412 (42) | 412 (42) | 392 (40) | 372 (38) | 343 (35) | 294 (30) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 275 (28) | 275 (28) | 275 (28) | 275 (28) | 275 (28) | 265 (27) | 255 (26) | 245 (25) | 216 (22) | 214 (21) | 186 (19) | — | — |
| | | $A$, % | 19 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 19 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| 25Х1МФ | Сталь горячекатаная, кованая, калиброванная диаметром или стороной квадрата до 90 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм²) | 883 (90) | 873 (89) | 834 (85) | 814 (83) | 804 (82) | 775 (79) | 765 (78) | 726 (74) | 716 (73) | 681 (70) | 628 (64) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | 736 (75) | 706 (72) | 697 (71) | 657 (67) | 647 (66) | 618 (63) | 608 (62) | 569 (58) | 559 (57) | 540 (55) | 530 (54) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| То же, более 90 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 883 | 873 | 834 | 814 | 804 | 775 | 765 | 726 | 716 | 681 | 628 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (90) | (89) | (85) | (83) | (82) | (79) | (78) | (74) | (73) | (70) | (64) | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 736 | 706 | 697 | 657 | 647 | 618 | 608 | 569 | 559 | 540 | 530 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (75) | (72) | (71) | (67) | (66) | (63) | (62) | (58) | (57) | (55) | (54) | — | — |
| | $A$, % | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | $Z$, % | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | — | — |
| То же, более 150 до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 883 | 873 | 834 | 814 | 804 | 775 | 765 | 726 | 716 | 687 | 628 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (90) | (89) | (85) | (83) | (82) | (79) | (78) | (74) | (73) | (70) | (64) | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 736 | 706 | 697 | 657 | 647 | 618 | 608 | 569 | 559 | 540 | 530 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (75) | (72) | (71) | (67) | (66) | (63) | (62) | (58) | (57) | (55) | (54) | — | — |
| | $A$, % | 11 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | $Z$, % | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | — | — |
| Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром до 200 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 589 | 579 | 549 | 540 | 540 | 510 | 510 | 481 | 471 | 461 | 412 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (60) | (59) | (56) | (55) | (55) | (52) | (52) | (49) | (48) | (47) | (42) | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 471 | 461 | 432 | 432 | 412 | 402 | 343 | 343 | 323 | 323 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (50) | (48) | (47) | (44) | (44) | (42) | (41) | (35) | (35) | (33) | (33) | — | — |
| | $A$, % | 14 | 13 | 11 | 11 | 11 | 11 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром до 200 мм КП590* | $R_m^T$, МПа | 736 | 716 | 687 | 667 | 667 | 628 | 628 | 598 | 589 | 569 | 510 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (70) | (68) | (68) | (64) | (64) | (61) | (60) | (58) | (52) | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 559 | 549 | 520 | 510 | 491 | 481 | 451 | 441 | 432 | 422 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (60) | (57) | (56) | (53) | (52) | (50) | (49) | (46) | (45) | (44) | (43) | — | — |
| | $A$, % | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| То же, до 200 мм, КП640* | $R_m^T$, МПа | 785 | 775 | 736 | 716 | 706 | 687 | 687 | 638 | 628 | 608 | 549 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (80) | (79) | (75) | (73) | (72) | (70) | (70) | (65) | (64) | (62) | (56) | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 640 | 608 | 598 | 569 | 559 | 540 | 530 | 491 | 481 | 471 | 461 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (65) | (62) | (61) | (58) | (57) | (55) | (54) | (50) | (49) | (48) | (47) | — | — |
| | $A$, % | 12 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — |
| То же, до 200 мм, КП670* | $R_m^T$, МПа | 785 | 775 | 775 | 765 | 765 | 755 | 725 | 695 | 645 | 589 | 529 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (80) | (79) | (79) | (78) | (78) | (77) | (74) | (71) | (66) | (60) | (54) | — | — |
| | $R_{p0,2}^T$, МПа | 670 | 638 | 638 | 628 | 608 | 589 | 559 | 520 | 490 | 452 | 402 | — | — |
| | (кгс/мм²) | (68) | (65) | (65) | (63) | (62) | (60) | (57) | (53) | (50) | (46) | (41) | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 16 | 16 | 17 | 17 | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 51 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 55 | 55 | 60 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 15Х1М1Ф | Трубы бесшовные горячекатаные с наружным ∅ = 57 ÷ 465 мм, с толщиной стенки от 3,5 до 60 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 471 (48) | 471 (48) | 441 (45) | 412 (42) | 392 (40) | 333 (34) | 323 (33) | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 314 (32) | 304 (31) | 304 (30) | 304 (30) | 284 (29) | 275 (28) | 265 (27) | 255 (26) | 235 (24) | 226 (23) | 205 (21) | 196 (20) | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 15 | 15 | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 46 | 48 | 50 | 50 | — |
| 15Х1М1ФЛ | Отливки | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 441 (45) | 441 (45) | 441 (45) | 441 (45) | 441 (45) | 441 (45) | 422 (43) | 412 (42) | 402 (41) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 314 (32) | 304 (31) | 304 (31) | 294 (30) | 284 (29) | 275 (28) | 255 (26) | 255 (26) | 235 (24) | 226 (23) | 177 (18) | 166 (17) | — |
| | | $A$, % | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | — |
| 12Х2МФА 12Х2МФА-А | Листы толщиной до 180 мм, поковки толщиной до 150 мм, КП395** | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | 500 (51) | 500 (51) | 491 (50) | 491 (50) | 491 (50) | 461 (47) | 432 (44) | 412 (42) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 432 (44) | 422 (43) | 422 (43) | 412 (42) | 412 (42) | 402 (41) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 363 (37) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, КП490** | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 569 (58) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 500 (51) | 481 (49) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 530 (54) | 520 (53) | 520 (53) | 510 (52) | 500 (51) | 500 (51) | 490 (50) | 490 (50) | 490 (50) | 480 (49) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | 38 | 38 | 38 | — | — |
| 18Х2МФА | Листы, поковки толщиной от 160 до 400 мм, КП490** | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 569 (58) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 530 (54) | 520 (53) | 520 (53) | 510 (52) | 500 (51) | 500 (51) | 490 (50) | 490 (50) | 490 (50) | 481 (49) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | 10 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15Х2МФА, 15Х2МФА-А | Листы, поковки толщиной от 400 до 650 мм, КП295** | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 38 | 38 | 38 | — | — |
| | | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 441 (45) | 432 (44) | 422 (43) | 412 (42) | 402 (41) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | 353 (36) | 333 (34) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 392 (40) | 383 (39) | 363 (37) | 353 (36) | 334 (34) | 324 (33) | 304 (31) | 295 (30) | 284 (29) | 265 (27) | 255 (26) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 54 | 54 | 53 | 52 | 51 | 50 | 47 | 47 | 47 | — | — |
| | То же, от 161 до 400 мм, КП395** | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | 500 (51) | 491 (50) | 481 (49) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 432 (44) | 412 (42) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 432 (44) | 422 (43) | 422 (43) | 422 (43) | 412 (42) | 402 (41) | 402 (41) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 363 (37) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 47 | 47 | 47 | — | — |
| 25Х2МФА | Поковки, листы (плиты), листовые и штампованные заготовки диаметром или толщиной до 70 мм, КП395** | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | 500 (51) | 491 (50) | 481 (49) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 441 (45) | 441 (45) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 432 (44) | 432 (44) | 422 (43) | 412 (42) | 402 (41) | 402 (41) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 373 (38) | 373 (38) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, до 750 мм, КП490** | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 569 (58) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 530 (54) | 530 (54) | 520 (53) | 510 (52) | 500 (51) | 500 (51) | 490 (50) | 490 (50) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| | Поковки, листы (плиты), листовые и штампованные заготовки диаметром или толщиной до 750 мм, КП590** | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 736 (75) | 716 (73) | 706 (72) | 697 (71) | 677 (69) | 667 (68) | 647 (66) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 628 (64) | 628 (64) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 598 (61) | 590 (60) | 590 (60) | 549 (56) | 540 (55) | 540 (55) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 25Х2М1Ф | Горячекатаные и кованые прутки и полосы диаметром или толщиной 90 мм, заготовки крепежных деталей диаметром или толщиной до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 785 | 765 | 765 | 755 | 745 | 735 | 725 | 687 | 677 | 647 | 608 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (78) | (78) | (77) | (76) | (75) | (74) | (70) | (69) | (66) | (62) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 667 | 667 | 651 | 647 | 647 | 628 | 618 | 598 | 578 | 559 | 539 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (68) | (68) | (67) | (66) | (66) | (64) | (63) | (61) | (59) | (57) | (55) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 49 | 49 | 49 | 49 | 50 | 51 | 54 | — | — |
| | Горячекатаные и кованые прутки и полосы диаметром или толщиной более 90 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 785 | 765 | 755 | 736 | 726 | 697 | 687 | 677 | 657 | 647 | 638 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (78) | (77) | (75) | (74) | (71) | (70) | (69) | (67) | (66) | (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 667 | 667 | 667 | 647 | 638 | 618 | 608 | 598 | 589 | 579 | 579 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (68) | (68) | (68) | (66) | (65) | (63) | (62) | (61) | (60) | (59) | (59) | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| | То же, но диаметром или толщиной более 150 до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 785 | 765 | 765 | 736 | 726 | 697 | 687 | 677 | 657 | 647 | 638 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (78) | (77) | (75) | (74) | (71) | (70) | (69) | (67) | (66) | (65) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 667 | 667 | 667 | 647 | 638 | 618 | 608 | 598 | 589 | 579 | 579 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (68) | (68) | (68) | (66) | (65) | (63) | (62) | (61) | (60) | (59) | (59) | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| | Поковки толщиной или диаметром от 100 до 300 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 67 | 638 | 628 | 608 | 598 | 579 | 569 | 559 | 540 | 500 | 500 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (67) | (65) | (64) | (62) | (61) | (59) | (58) | (57) | (55) | (51) | (51) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 471 | 461 | 451 | 441 | 432 | 422 | 412 | 392 | 392 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (50) | (48) | (47) | (46) | (45) | (44) | (43) | (42) | (40) | (40) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25Х3МФА | Поковки, листы (плиты), листовые и штампованные заготовки толщиной от 450 до 600 мм, КП395** | $Z$, % | 40 | 40 | 41 | 41 | 42 | 42 | 42 | 42 | 43 | 43 | 43 | — | — |
| | | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | 500 (51) | 491 (50) | 481 (49) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 441 (45) | 441 (45) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 432 (44) | 432 (44) | 422 (43) | 412 (42) | 402 (41) | 402 (41) | 395 (40) | 395 (40) | 395 (40) | 373 (38) | 373 (38) | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 12 | 12 | 12 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, от 450 до 600 мм, КП490** | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 569 (58) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 530 (54) | 530 (54) | 520 (53) | 510 (52) | 500 (51) | 500 (51) | 490 (50) | 490 (50) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| | То же, от 450 до 600 мм, КП590** | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 736 (75) | 716 (73) | 706 (72) | 697 (71) | 687 (70) | 667 (68) | 647 (66) | 638 (65) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 628 (64) | 628 (64) | 618 (63) | 608 (62) | 598 (61) | 598 (61) | 590 (60) | 590 (60) | 549 (56) | 540 (55) | 540 (55) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| | То же, от 450 до 600 мм, КП685** | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 834 (85) | 814 (83) | 804 (82) | 795 (81) | 785 (80) | 765 (78) | 746 (76) | 736 (75) | 697 (71) | 687 (70) | 677 (69) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 729 (74) | 729 (74) | 716 (73) | 706 (72) | 706 (72) | 697 (71) | 685 (70) | 685 (70) | 638 (65) | 628 (64) | 628 (64) | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | 10 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — |
| 10Х2М1ФБ | Поковки толщиной не менее 100 и не более 400 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 343 (35) | 337 (34,4) | 328 (33,5) | 319 (32,5) | 310 (32) | 301 (31) | 292 (29,8) | 282 (29) | 273 (28) | 264 (27) | 255 (26) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 195 (20) | 193 (19,6) | 189 (19) | 189 (19) | 179 (18) | 179 (18) | 170 (17,3) | 166 (16,4) | 161 (16,2) | 156 (16) | 152 (15) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 19 | 19 | 18 | 17 | 17 | 16 | 15 | 14 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, КП245* | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 392 (40) | 381 (39) | 363 (37) | 345 (35,2) | 328 (33,5) | 310 (32) | 292 (30) | 274 (28) | 267 (27) | 267 (27) | 252 (26) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 245 (25) | 242 (24,7) | 238 (24) | 233 (23,7) | 229 (23,3) | 225 (23) | 220 (22,5) | 215 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 186 (19) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 19 | 18 | 17 | 15 | 15 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| 10Х2М1ФБ | Листы толщиной до 150 мм, КП195* | $R_m^T$, МПа | 343 | 337 | 328 | 319 | 310 | 300 | 291 | 282 | 273 | 263 | 254 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (35) | (34,4) | (33,4) | (32,6) | (32) | (30,6) | (30) | (28,7) | (28) | (27) | (26) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 195 | 193 | 188 | 188 | 179 | 179 | 170 | 165 | 161 | 156 | 152 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (19,6) | (19) | (19) | (18) | (18) | (17,3) | (16,8) | (16,4) | (16) | (15,5) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 19,5 | 19 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | 16 | 15 | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 50 | 50 | 50 | — | — |
| | То же, КП245* | $R_m^T$, МПа | 392 | 385 | 376 | 364 | 353 | 342 | 331 | 320 | 309 | 298 | 294 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (39) | (38,3) | (37) | (36) | (34,8) | (33,7) | (32,6) | (31,5) | (30,4) | (30) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 244 | 241 | 238 | 235 | 231 | 228 | 225 | 222 | 218 | 208 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (25) | (24,9) | (24,5) | (24,2) | (24) | (23,5) | (23) | (22,9) | (22,7) | (22) | (21) | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 19,5 | 18,7 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 13 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 45 | 45 | — | — |
| 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А | Поковки, листы, штамповки диаметром или толщиной от 400 до 650 мм, КП395** | $R_m^T$, МПа | 549 | 539 | 529 | 519 | 510 | 500 | 500 | 491 | — | — | — | — | |
| | | (кгс/мм$^2$) | (56) | (55) | (54) | (53) | (52) | (51) | (51) | (50) | | | | | |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 441 | 431 | 421 | 412 | 402 | 402 | 402 | 395 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (43) | (42) | (41) | (41) | (41) | (40) | | | | | |
| | | $A$, % | 15 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 54 | 53 | 52 | 50 | 48 | 46 | 45 | — | — | — | — | — |
| | То же, от 160 до 400 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 608 | 593 | 588 | 578 | 568 | 559 | 549 | 539 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (62) | (61) | (60) | (59) | (58) | (57) | (56) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 480 | 470 | 461 | 451 | 451 | 451 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (49) | (48) | (47) | (46) | (46) | (46) | (45) | | | | | |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 54 | 53 | 52 | 51 | 51 | 51 | 50 | — | — | — | — | — |
| | Поковки, листы штамповки диамет- | $R_m^T$, МПа | 441 | 432 | 422 | 412 | 402 | 402 | 402 | 392 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (43) | (42) | (41) | (41) | (41) | (40) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 392 | 392 | 373 | 363 | 363 | 363 | 353 | 295 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ром или толщиной от 400 до 650 мм, КП295** | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (38) | (37) | (37) | (37) | (36) | (30) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 54 | 54 | 53 | 52 | 51 | 50 | 50 | — | — | — | — | — |
| | То же, от 160 до 400 мм, КП395** | $R_m^T$, МПа | 549 | 549 | 549 | 530 | 520 | 510 | 510 | 491 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (56) | (56) | (56) | (54) | (53) | (52) | (52) | (50) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 441 | 432 | 412 | 402 | 395 | 395 | 395 | 395 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (45) | (44) | (42) | (41) | (40) | (40) | (40) | (40) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 49 | 49 | 48 | 47 | 46 | 45 | 45 | — | — | — | — | — |
| 15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А | Листы, поковки толщиной до 450 мм | $R_m^T$, МПа | 589 | 569 | 540 | 520 | 520 | 510 | 500 | 491 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (58) | (55) | (53) | (53) | (52) | (51) | (50) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 491 | 471 | 451 | 441 | 441 | 441 | 422 | 392 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (48) | (46) | (45) | (45) | (45) | (43) | (40) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | — | — | — | — | — |
| 36Х2Н2МФА | Заготовки крепежных деталей толщиной до 200 мм, КП395* | $R_m^T$, МПа | 618 | 618 | 618 | 598 | 569 | 569 | 540 | 510 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (63) | (63) | (63) | (61) | (58) | (58) | (55) | (52) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 395 | 395 | 395 | 383 | 363 | 353 | 343 | 245 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (40) | (39) | (37) | (36) | (35) | (25) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | Заготовки крепежных деталей толщиной до 200 мм, КП490* | $R_m^T$, МПа | 657 | 657 | 657 | 638 | 598 | 598 | 569 | 540 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (67) | (67) | (67) | (65) | (61) | (61) | (58) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 490 | 481 | 451 | 441 | 432 | 402 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (50) | (49) | (46) | (45) | (44) | (41) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, КП590* | $R_m^T$, МПа | 687 | 687 | 687 | 667 | 638 | 628 | 598 | 569 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (70) | (70) | (68) | (65) | (64) | (61) | (58) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 590 | 590 | 569 | 540 | 530 | 510 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (60) | (60) | (58) | (55) | (54) | (52) | (45) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, КП640 | $R_m^T$, МПа | 686 | 686 | 656 | 627 | 627 | 607 | 597 | 578 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (70) | (67) | (64) | (64) | (62) | (61) | (59) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 640 | 640 | 615 | 583 | 583 | 562 | 551 | 476 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (65) | (63) | (59) | (59) | (57) | (56) | (48) | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 36Х2Н2МФА | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, КП685* | $R_m^T$, МПа | 785 | 785 | 785 | 755 | 736 | 726 | 687 | 657 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (80) | (80) | (77) | (75) | (74) | (70) | (67) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 685 | 685 | 685 | 657 | 638 | 628 | 589 | 540 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (70) | (70) | (67) | (65) | (64) | (60) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, КП785* | $R_m^T$, МПа | 883 | 883 | 883 | 853 | 824 | 814 | 785 | 736 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (90) | (90) | (90) | (87) | (84) | (83) | (80) | (75) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 785 | 785 | 785 | 755 | 726 | 716 | 687 | 638 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (80) | (80) | (77) | (74) | (73) | (70) | (65) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| 38ХН3МФА | Заготовки | $R_m^T$, МПа | 657 | 657 | 628 | 608 | 608 | 589 | 579 | 559 | — | — | — | — | — |
| | крепежных деталей толщиной до 200 мм, КП490* | (кгс/мм$^2$) | (67) | (67) | (64) | (62) | (62) | (60) | (59) | (57) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 471 | 451 | 451 | 432 | 422 | 343 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (50) | (48) | (46) | (46) | (44) | (43) | (35) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, КП590* | $R_m^T$, МПа | 687 | 687 | 657 | 628 | 628 | 608 | 598 | 579 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (70) | (67) | (64) | (64) | (62) | (61) | (59) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 590 | 569 | 540 | 540 | 520 | 510 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (58) | (55) | (55) | (53) | (52) | (45) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, КП640* | $R_m^T$, МПа | 687 | 687 | 657 | 628 | 628 | 608 | 598 | 579 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (70) | (67) | (64) | (64) | (62) | (61) | (59) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 640 | 640 | 615 | 583 | 583 | 562 | 551 | 476 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (кгс/мм²) | (65) | (65) | (63) | (59) | (59) | (57) | (56) | (48) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, | $R^T_m$, МПа | 785 | 785 | 755 | 726 | 726 | 706 | 687 | 667 | — | — | — | — | — |
| | КП685* | (кгс/мм²) | (80) | (80) | (77) | (74) | (74) | (72) | (70) | (68) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 685 | 685 | 657 | 638 | 628 | 608 | 589 | 540 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (70) | (67) | (65) | (64) | (62) | (60) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, | $R^T_m$, МПа | 883 | 883 | 844 | 824 | 814 | 785 | 785 | 746 | — | — | — | — | — |
| | КП785* | (кгс/мм²) | (90) | (90) | (86) | (84) | (83) | (80) | (80) | (76) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 785 | 785 | 746 | 726 | 716 | 697 | 677 | 638 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (80) | (80) | (76) | (74) | (73) | (71) | (69) | (65) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | То же, | $R^T_m$, МПа | 981 | 981 | 942 | 912 | 903 | 883 | 863 | 834 | — | — | — | — | — |
| | КП880* | (кгс/мм²) | (100) | (100) | (96) | (93) | (92) | (90) | (88) | (85) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 880 | 880 | 844 | 814 | 804 | 785 | 765 | 746 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (90) | (90) | (86) | (83) | (82) | (80) | (78) | (75) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 40 | — | — | — | — | — |
| 20Х1М1Ф1БР | Заготовки | $R^T_m$, МПа | 785 | 775 | 765 | 755 | 746 | 736 | 726 | 716 | 697 | 647 | 598 | — | — |
| | крепежных де- | (кгс/мм²) | (80) | (79) | (78) | (77) | (76) | (75) | (74) | (73) | (71) | (66) | (61) | — | — |
| | талей толщи- | $R^T_{p0,2}$, МПа | 670 | 670 | 657 | 647 | 627 | 598 | 568 | 519 | 510 | 490 | 470 | — | — |
| | ной до 200 мм, | (кгс/мм²) | (68) | (68) | (67) | (66) | (64) | (61) | (58) | (53) | (52) | (50) | (48) | — | — |
| | КП670* | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 11 | 11 | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 51 | 53 | 55 | — | — |
| 15ГС | Бесшовные | $R^T_m$, МПа | 491 | 471 | 461 | 451 | 441 | 422 | 412 | 412 | 412 | — | — | — | — |
| | горячекатаные | (кгс/мм²) | (50) | (48) | (47) | (46) | (45) | (43) | (42) | (42) | (42) | — | — | — | — |
| | трубы наруж- | $R^T_{p0,2}$, МПа | 275 | 265 | 265 | 255 | 255 | 245 | 226 | 196 | 167 | — | — | — | — |
| | ным $\varnothing = 10 \div$ | (кгс/мм²) | (28) | (27) | (27) | (26) | (26) | (25) | (23) | (20) | (17) | — | — | — | — |
| | $\div 465$ мм, с толщиной стенки от 2 до 60 мм | $A$, % | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 15 | 16 | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — |
| 16ГС | Листы горя- | $R^T_m$, МПа | 451 | 422 | 392 | 392 | 392 | 392 | 373 | 373 | — | — | — | — | — |
| | чекатаные толщиной от 2 до | (кгс/мм²) | (46) | (43) | (40) | (40) | (40) | (40) | (38) | (38) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 235 | 235 | 226 | 216 | 216 | 196 | 177 | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 16ГС | 160 мм | (кгс/мм²) | (25) | (24) | (24) | (23) | (22) | (22) | (20) | (18) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 21 | 21 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 41 | 40 | 40 | 39 | 39 | 39 | 42 | — | — | — | — | — |
| 20ГСЛ | Отливки | $R^T_m$, МПа | 491 | 471 | 441 | 441 | 422 | 422 | 422 | 422 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (48) | (45) | (45) | (43) | (43) | (43) | (43) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 275 | 275 | 255 | 235 | 226 | 196 | 186 | 186 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (28) | (28) | (26) | (24) | (23) | (20) | (19) | (19) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | — | — | — | — | — |
| 09Г2С | Прокат толщиной от 4 до 160 мм | $R^T_m$, МПа | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 432 | 392 | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (44) | (40) | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 235 | 235 | 226 | 216 | 216 | 196 | 177 | 157 | 157 | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (24) | (24) | (23) | (22) | (22) | (20) | (18) | (16) | (16) | — | — | — |
| | | $A$, % | 21 | 20 | 20 | 18 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 42 | 42 | 41 | 40 | 40 | 41 | 42 | 44 | 44 | — | — | — |
| 08Х13 | Листы толщиной от 4 до 50 мм | $R^T_m$, МПа | 422 | 402 | 392 | 373 | 363 | 353 | 343 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (43) | (41) | (40) | (38) | (37) | (36) | (35) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 275 | 275 | 275 | 255 | 245 | 235 | 235 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (28) | (28) | (28) | (26) | (25) | (24) | (24) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 23 | 21 | 20 | 20 | 20 | 17 | 15 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 55 | 56 | 58 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — | — | — | — | — |
| | Трубы наружным диаметром от 5 до 250 мм, с толщиной стенки от 0,2 до 22 мм | $R^T_m$, МПа | 373 | 363 | 353 | 333 | 323 | 314 | 314 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (38) | (37) | (36) | (34) | (33) | (32) | (32) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 245 | 245 | 226 | 216 | 216 | 216 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (25) | (25) | (23) | (22) | (22) | (22) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 22 | 20 | 19 | 18 | 18 | 15 | 13 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 43 | 43 | 44 | 43 | 43 | 40 | 38 | — | — | — | — | — | — |
| 20Х13 | Поковки | $R^T_m$, МПа | 647 | 628 | 608 | 589 | 569 | 549 | 530 | — | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| диаметром | (кгс/мм$^2$) | (66) | (64) | (62) | (60) | (58) | (56) | (54) | — | — | — | — | — | — |
| или толщиной | $R^T_{p0,2}$, МПа | 441 | 422 | 412 | 392 | 392 | 363 | 353 | — | — | — | — | — | — |
| до 300 мм | (кгс/мм$^2$) | (45) | (43) | (42) | (40) | (40) | (37) | (36) | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 12 | 11 | 11 | 10 | 10 | 9 | 9 | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — |
| Горячекатаная сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной до 60 мм, калиброванная сталь диаметром или стороной квадрата до 70 мм | $R^T_m$, МПа | 647 | 628 | 608 | 589 | 569 | 549 | 530 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (66) | (64) | (62) | (60) | (58) | (56) | (54) | — | — | — | — | — | — |
| | $R^T_{p0,2}$, МПа | 441 | 422 | 412 | 392 | 392 | 363 | 353 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (45) | (43) | (42) | (40) | (40) | (37) | (36) | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — | — | — | — | — | — |
| Горячекатаная сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной более 60 до 100 мм | $R^T_m$, МПа | 647 | 628 | 608 | 589 | 569 | 549 | 530 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (66) | (64) | (62) | (60) | (58) | (56) | (54) | — | — | — | — | — | — |
| | $R^T_{p0,2}$, МПа | 441 | 422 | 412 | 392 | 392 | 363 | 353 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (45) | (43) | (42) | (40) | (40) | (37) | (36) | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — | — | — | — | — |
| Горячекатаная сталь со стороной квадрата или толщиной более 100 до 150 мм | $R^T_m$, МПа | 647 | 628 | 608 | 589 | 569 | 549 | 530 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (66) | (64) | (62) | (60) | (58) | (56) | (54) | — | — | — | — | — | — |
| | $R^T_{p0,2}$, МПа | 441 | 422 | 412 | 392 | 392 | 363 | 353 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (45) | (43) | (42) | (40) | (40) | (37) | (36) | — | — | — | — | — | — |
| | $A$, % | 13 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — | — | — | — | — |
| | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — | — | — | — | — |
| Заготовки крепежных деталей, КП590* | $R^T_m$, МПа | 785 | 755 | 736 | 716 | 687 | 667 | 638 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (80) | (77) | (75) | (73) | (70) | (68) | (65) | — | — | — | — | — | — |
| | $R^T_{p0,2}$, МПа | 590 | 559 | 549 | 520 | 520 | 481 | 471 | — | — | — | — | — | — |
| | (кгс/мм$^2$) | (60) | (57) | (56) | (53) | (53) | (49) | (48) | — | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 20Х13 | Листы толщиной от 4 до 50 мм | $A$, % | 15 | 16 | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_m^T$, МПа | 510 | 491 | 481 | 471 | 441 | 432 | 412 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (52) | (50) | (49) | (48) | (45) | (44) | (42) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 373 | 353 | 343 | 323 | 323 | 304 | 294 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (38) | (36) | (35) | (33) | (33) | (31) | (30) | — | — | — | — | — | — |
| 20Х12ВНМФ | Заготовки крепежных деталей толщиной до 200 мм, КП670* | $A$, % | 20 | 21 | 21 | 20 | 20 | 19 | 19 | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_m^T$, МПа | 785 | 775 | 755 | 736 | 716 | 697 | 677 | 647 | 628 | 588 | 529 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (79) | (77) | (75) | (73) | (71) | (69) | (66) | (64) | (60) | (54) | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 670 | 657 | 638 | 618 | 608 | 589 | 569 | 520 | 510 | 481 | 461 | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (68) | (67) | (65) | (63) | (62) | (60) | (58) | (53) | (52) | (49) | (47) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 12 | 13 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 44 | 44 | 44 | 45 | 49 | — | — |
| 09Х17Н | Поковки диаметром или толщиной под термическую обработку до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 441 | 432 | 422 | 412 | 402 | 392 | 373 | 373 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (44) | (43) | (42) | (41) | (40) | (38) | (38) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 343 | 343 | 333 | 323 | 314 | 304 | 304 | 294 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (35) | (35) | (34) | (33) | (32) | (31) | (31) | (30) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | — | — | — | — | — |
| | Заготовки в виде поковок, штамповок и прутков круглого сечения от 5 до 250 мм, квадратного — от 40 до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 540 | 530 | 500 | 491 | 471 | 451 | 432 | 422 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (54) | (51) | (50) | (48) | (46) | (44) | (43) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 392 | 353 | 363 | 353 | 333 | 323 | 314 | 294 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (36) | (37) | (36) | (34) | (33) | (32) | (30) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 14 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30Х13 | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром до 200 мм, КП590* | $R_m^T$, МПа | 785 | 755 | 736 | 716 | 687 | 667 | 647 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (77) | (75) | (73) | (70) | (68) | (66) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 590 | 579 | 569 | 559 | 549 | 540 | 530 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (59) | (58) | (57) | (56) | (55) | (54) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 44 | 43 | — | — | — | — | — | — |
| | То же, КП685* | $R_m^T$, МПа | 883 | 853 | 824 | 795 | 765 | 746 | 726 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (90) | (87) | (84) | (81) | (78) | (76) | (74) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 685 | 685 | 677 | 667 | 657 | 638 | 628 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (70) | (69) | (68) | (67) | (65) | (64) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 | 7 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — |
| | То же, КП785* | $R_m^T$, МПа | 981 | 942 | 922 | 883 | 853 | 824 | 804 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (100) | (96) | (94) | (90) | (87) | (84) | (82) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 785 | 775 | 765 | 746 | 736 | 716 | 706 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (80) | (79) | (78) | (76) | (75) | (73) | (72) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 | 7 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — | — |
| 14Х17Н2 | Сортовой прокат, заготовки крепежных деталей, поковки диаметром или толщиной под термообработку не более 60 мм | $R_m^T$, МПа | 1080 | 1060 | 1050 | 1040 | 1030 | 1010 | 1000 | 961 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (110) | (108) | (107) | (106) | (105) | (103) | (102) | (98) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 834 | 824 | 824 | 814 | 804 | 795 | 785 | 785 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (85) | (84) | (84) | (83) | (82) | (81) | (80) | (80) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 25 | 24 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | — | — | — | — | — |
| | То же, более 60 мм, КП540* | $R_m^T$, МПа | 687 | 687 | 667 | 657 | 657 | 638 | 638 | 608 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (70) | (70) | (68) | (67) | (67) | (65) | (65) | (62) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 540 | 530 | 530 | 520 | 520 | 510 | 510 | 510 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (54) | (54) | (53) | (53) | (52) | (52) | (52) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 38 | 36 | 35 | 34 | 34 | — | — | — | — | — |
| 08Х14МФ | Поковки, заготовки трубы, листы | $R_m^T$, МПа | 539 | 519 | 510 | 491 | 491 | 491 | 491 | 431 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (53) | (52) | (50) | (50) | (50) | (50) | (44) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 343 | 333 | 323 | 314 | 304 | 294 | 294 | 284 | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 08Х14МФ | Трубы, листы, предназначенные для развальцовки и штамповки | (кгс/мм²) | (35) | (34) | (33) | (32) | (31) | (30) | (30) | (29) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_m$, МПа | 441 | 431 | 421 | 412 | 402 | 392 | 392 | 363 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (45) | (44) | (43) | (42) | (41) | (40) | (40) | (37) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 245 | 245 | 235 | 225 | 216 | 196 | 196 | 196 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (25) | (25) | (24) | (23) | (22) | (20) | (20) | (20) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 22 | 22 | 21 | 20 | 20 | 18 | 18 | 18 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — | — | — | — |
| 1Х12В2МФ | Трубы | $R^T_m$, МПа | 491 | 441 | 422 | 412 | 402 | 392 | 392 | 373 | 373 | 363 | 343 | 294 | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (45) | (43) | (42) | (41) | (40) | (40) | (38) | (38) | (37) | (35) | (30) | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 294 | 294 | 284 | 275 | 265 | 255 | 245 | 235 | 235 | 235 | 235 | 196 | — |
| | | (кгс/мм²) | (30) | (30) | (29) | (28) | (27) | (26) | (25) | (24) | (24) | (24) | (24) | (20) | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | — |
| | | $Z$, % | 35 | 36 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — |
| 18Х12ВМБФР | Заготовки крепежных деталей толщиной или диаметром 200 мм, КП670* | $R^T_m$, МПа | 785 | 775 | 755 | 746 | 726 | 706 | 687 | 667 | 628 | 589 | 549 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (80) | (79) | (77) | (76) | (74) | (72) | (70) | (68) | (64) | (60) | (56) | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 670 | 667 | 657 | 647 | 647 | 638 | 638 | 618 | 598 | 569 | 530 | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (68) | (68) | (67) | (66) | (66) | (65) | (65) | (63) | (61) | (58) | (54) | — | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 | 13 | 13 | 14 | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 47 | 47 | 48 | 50 | — | — |
| 05Х12Н2М-ВИ, 05Х12Н2М | Трубы | $R^T_m$, МПа | 539 | 539 | 539 | 539 | 519 | 500 | 480 | 470 | 451 | 431 | 412 | 392 | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (55) | (55) | (55) | (53) | (51) | (49) | (48) | (46) | (44) | (42) | (40) | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 372 | 372 | 372 | 372 | 363 | 353 | 333 | 333 | 314 | 304 | 284 | 274 | — |
| | | (кгс/мм²) | (38) | (38) | (38) | (38) | (37) | (36) | (34) | (34) | (32) | (31) | (29) | (28) | — |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — |
| 05Х12Н2М-ВД, 05Х12Н2М | Поковки, лист | $R^T_m$, МПа | 539 | 539 | 539 | 539 | 539 | 519 | 500 | 480 | 461 | 421 | 372 | 353 | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (55) | (55) | (55) | (55) | (53) | (51) | (49) | (47) | (43) | (38) | (36) | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 372 | 372 | 372 | 372 | 372 | 363 | 363 | 333 | 323 | 314 | 265 | 245 | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (кгс/мм²) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (37) | (37) | (34) | (33) | (31) | (27) | (25) | — |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 15 | — |
| | | $Z$, % | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | — |
| 06Х13Н7Д2 | Горячекатаные и кованые прутки диаметром от 16 до 160 мм, кованая полоса толщиной 80 мм, заготовки крепежных деталей диаметром до 160 мм | $R^T_m$, МПа | 882 | 853 | 804 | 764 | 725 | 686 | 676 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (90) | (87) | (82) | (78) | (74) | (70) | (69) | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 804 | 784 | 735 | 696 | 657 | 627 | 617 | — | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (82) | (80) | (75) | (71) | (67) | (64) | (63) | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 59 | — | — | — | — | — | — |
| 06Х12Н3ДЛ | Отливки | $R^T_m$, МПа | 637 | 630 | 618 | 608 | 589 | 579 | 559 | 539 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (64) | (63) | (62) | (60) | (59) | (57) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 490 | 486 | 481 | 481 | 471 | 461 | 451 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (49,6) | (49) | (49) | (48) | (47) | (46) | (45) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 37 | 40 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| 06Х12Н3Д | Поковки КП540* | $R^T_m$, МПа | 637 | 630 | 618 | 589 | 589 | 579 | 559 | 539 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (65) | (61) | (63) | (60) | (60) | (59) | (57) | (55) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 540 | 530 | 519 | 500 | 480 | 461 | 441 | 441 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (54) | (53) | (51) | (49) | (47) | (45) | (45) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 37 | 40 | 40 | — | — | — | — | — |
| | Поковки КП590* | $R^T_m$, МПа | 686 | 670 | 657 | 647 | 638 | 618 | 588 | 588 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (68) | (67) | (66) | (65) | (63) | (60) | (60) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 590 | 575 | 559 | 549 | 539 | 519 | 491 | 491 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (59) | (57) | (56) | (55) | (53) | (50) | (50) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 10 | 10 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 30 | 30 | 30 | | | | | |
| | Листы толщиной от 25 до 250 мм | $R^T_m$, МПа | 686 | 670 | 657 | 647 | 638 | 618 | 588 | 588 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (70) | (68) | (67) | (66) | (65) | (63) | (60) | (60) | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 539 | 534 | 529 | 529 | 519 | 500 | 491 | 491 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (54,5) | (54) | (54) | (53) | (51) | (50) | (50) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 07Х16Н4Б | Сортовой прокат диаметром, стороной квадрата от 30 до 180 мм, поковки диаметром, стороной квадрата от 180 до 400 мм | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 32 | 32 | 37 | 40 | — | — | — | — | — |
| | | $R_m^T$, МПа | 882 | 880 | 850 | 830 | 770 | 760 | 730 | 720 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (90) | (89,7) | (87) | (85) | (79) | (78) | (75) | (74) | — | | | | |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 735 | 735 | 720 | 710 | 700 | 680 | 670 | 650 | — | — | — | — | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (75) | (75) | (74) | (73) | (71) | (69) | (68) | (66) | — | | | | |
| | | $A$, % | 13 | 13 | 12 | 12 | 11 | 11 | 10 | 9 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | — | — | — | — | — |
| 09Х18Н9 (10Х18Н9) | Листы толщиной от 6 до 160 мм | $R_m^T$, МПа | 491 | 451 | 412 | 392 | 392 | 373 | 363 | 353 | 353 | 343 | 343 | 323 | 294 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (46) | (42) | (40) | (40) | (38) | (37) | (36) | (36) | (35) | (35) | (33) | (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 177 | 167 | 157 | 147 | 137 | 137 | 128 | 128 | 118 | 108 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (18) | (17) | (16) | (15) | (14) | (14) | (13) | (13) | (12) | (11) | (11) |
| | | $A$, % | 50 | 46 | 42 | 38 | 37 | 35 | 33 | 32 | 31 | 30 | 30 | 30 | 28 |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | Поковки толщиной до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 540 | 500 | 451 | 432 | 432 | 412 | 402 | 392 | 373 | 353 | 323 | 304 | 255 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (51) | (46) | (44) | (44) | (42) | (41) | (40) | (38) | (36) | (33) | (31) | (26) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 177 | 157 | 147 | 137 | 128 | 118 | 118 | 108 | 98 | 98 | 98 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (18) | (16) | (15) | (14) | (13) | (12) | (12) | (11) | (10) | (10) | (10) |
| | | $A$, % | 40 | 38 | 36 | 34 | 33 | 31 | 29 | 28 | 28 | 27 | 27 | 27 | 25 |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| | Поковки толщиной свыше 60 до 300 мм | $R_m^T$, МПа | 491 | 470 | 451 | 425 | 400 | 380 | 380 | 340 | 323 | 314 | 304 | 294 | 280 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (50) | (48) | (46) | (43) | (41) | (39) | (37) | (35) | (33) | (32) | (31) | (30) | (29) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 177 | 157 | 147 | 137 | 128 | 118 | 118 | 108 | 98 | 98 | 98 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (18) | (16) | (15) | (14) | (13) | (12) | (12) | (11) | (10) | (10) | (10) |
| | | $A$, % | 38 | 36 | 34 | 32 | 31 | 29 | 27 | 26 | 26 | (25) | (25) | (25) | (24) |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 09Х18Н9 (10Х18Н9), 12Х18Н9 | Трубы бесшовные холоднокатаные наружным диаметром от 16 до 70 мм, с толщиной стенки от 2,5 до 12 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 451 (46) | 412 (42) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | 363 (37) | 353 (36) | 353 (36) | 343 (35) | 343 (35) | 323 (33) | 294 (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 196 (20) | 177 (18) | 167 (17) | 157 (16) | 147 (15) | 137 (14) | 128 (13) | 118 (12) | 118 (12) | 108 (11) | 98 (10) | 98 (10) |
| | | $A$, % | 40 | 38 | 36 | 33 | 32 | 30 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 |
| | | $Z$, % | 55 | 53 | 53 | 53 | 52 | 52 | 52 | 51 | 50 | 50 | 48 | 46 | 39 |
| 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т | Сортовой прокат и поковки из него толщиной или диаметром до 200 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 480 (49) | 461 (47) | 436 (44,6) | 417 (42,5) | 397 (40,5) | 377 (38,5) | 353 (36) | 328 (33,5) | 314 (32) | 289 (29,5) | 270 (27,5) | 250 (25,5) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 191 (19,5) | 189 (19,3) | 186 (19) | 181 (18,6) | 176 (18) | 172 (17,5) | 167 (17) | 162 (16,5) | 157 (16) | 152 (15,5) | 150 (15,3) | 147 (15) |
| | | $A$, % | 38 | 37 | 36 | 33 | 31 | 28 | 26 | 25 | 22 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Плиты, поковки из слитка, листовые заготовки и штамповки диаметром более 40 до 200 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 477 (48,7) | 456 (46,5) | 426 (43,5) | 417 (42,5) | 382 (39) | 358 (36,5) | 333 (34) | 309 (31,5) | 289 (29,5) | 260 (26,5) | 235 (24) | 216 (22) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 193 (19,7) | 186 (19) | 181 (18,5) | 176 (18) | 167 (17) | 162 (16,5) | 157 (16) | 152 (15,5) | 144 (14,7) | 137 (14) | 132 (13,5) | 127 (13) |
| | | $A$, % | 35 | 34 | 33 | 31 | 29 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 22 | 21 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | То же, диаметром более 200 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 475 (48,5) | 446 (45,5) | 421 (43) | 392 (40) | 368 (37,5) | 343 (35) | 314 (32) | 289 (29,5) | 260 (26,5) | 235 (24) | 206 (21) | 181 (18,5) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 191 (19,5) | 181 (18,5) | 172 (17,5) | 164 (16,7) | 152 (15,5) | 147 (15) | 137 (14) | 132 (13,5) | 123 (12,5) | 113 (11,5) | 103 (10,5) | 98 (10) |
| | | $A$, % | 35 | 34 | 33 | 31 | 29 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 22 | 21 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Трубы | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 510 (52) | 471 (48) | 461 (47) | 441 (45) | 421 (43) | 421 (43) | 412 (42) | 412 (42) | 402 (41) | 382 (39) | 353 (36) | 333 (34) | 304 (31) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 216 (22) | 206 (21) | 206 (21) | 196 (20) | 187 (19) | 187 (19) | 177 (18) | 177 (18) | 167 (17) | 157 (16) | 147 (15) | 147 (15) | 137 (14) |
| | | $A$, % | 35 | 32 | 30 | 28 | 27 | 26 | 26 | 26 | 25 | 25 | 24 | 23 | 22 |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 54 | 54 | 53 | 52 | 51 | 50 | 48 | 47 | 45 | 40 |
| 08Х18Н12Т | Толстолистовая сталь толщиной от | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 510 (52) | 491 (50) | 432 (44) | 412 (42) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | 373 (38) | 363 (37) | 333 (34) | 323 (33) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 206 | 196 | 177 | 167 | 167 | 157 | 157 | 157 | 147 | 137 | 128 | 128 | 118 |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 08Х18Н12Т | 4 до 160 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | (21) | (20) | (18) | (17) | (17) | (16) | (16) | (16) | (15) | (14) | (13) | (13) | (12) |
| | | $A$, % | 43 | 42 | 38 | 34 | 32 | 30 | 27 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 54 | 54 | 53 | 53 | 52 | 52 | 50 | 50 | 47 | 44 |
| | Поковки, листы, листовые и объемные штамповки, кованo-катаные заготовки толщиной до 60 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 471 (48) | 412 (42) | 392 (40) | 373 (38) | 373 (38) | 373 (38) | 353 (36) | 353 (36) | 353 (36) | 353 (36) | 323 (33) | 294 (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 196 (20) | 167 (17) | 157 (16) | 157 (16) | 147 (15) | 147 (15) | 147 (15) | 137 (14) | 128 (13) | 118 (12) | 118 (12) | 108 (11) |
| | | $A$, % | 38 | 37 | 34 | 30 | 28 | 26 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 48 | 48 | 47 | 47 | 45 | 45 | 43 | 40 |
| | То же, более 60 до 300 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 491 (50) | 471 (48) | 412 (42) | 392 (40) | 373 (38) | 373 (38) | 373 (38) | 353 (36) | 353 (36) | 353 (36) | 353 (36) | 323 (33) | 294 (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 196 (20) | 167 (17) | 157 (16) | 157 (16) | 147 (15) | 147 (15) | 147 (15) | 137 (14) | 128 (13) | 118 (12) | 118 (12) | 108 (11) |
| | | $A$, % | 33 | 32 | 29 | 26 | 24 | 23 | 21 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 38 | 37 | 37 | 36 | 36 | 34 | 32 |
| 12Х18Н9Т, 12Х18Н12Т | Заготовки в виде поковок и штамповок для листов и труб, поковки | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 520 (53) | 500 (51) | 432 (44) | 412 (42) | 392 (40) | 392 (40) | 392 (40) | 383 (39) | 373 (38) | 373 (38) | 363 (37) | 333 (34) | 294 (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 196 (20) | 196 (20) | 167 (17) | 157 (16) | 157 (16) | 147 (15) | 147 (15) | 147 (15) | 137 (14) | 128 (13) | 118 (12) | 118 (12) | 108 (11) |
| | | $A$, % | 39 | 38 | 34 | 31 | 28 | 26 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 48 | 48 | 46 | 46 | 44 | 44 | 43 | 40 |
| | Листы толщиной от 0,5 до 160 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 530 (54) | 510 (52) | 441 (45) | 422 (43) | 402 (41) | 402 (41) | 402 (41) | 392 (40) | 383 (39) | 383 (39) | 373 (38) | 343 (35) | 294 (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм$^2$) | 235 (24) | 235 (24) | 196 (20) | 186 (19) | 186 (19) | 177 (18) | 177 (18) | 177 (18) | 167 (17) | 157 (16) | 137 (14) | 137 (14) | 128 (13) |
| | | $A$, % | 38 | 37 | 33 | 30 | 27 | 26 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| | | $Z$, % | 45 | 43 | 43 | 42 | 42 | 42 | 41 | 40 | 40 | 38 | 37 | 32 | 32 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Горячекатаная и кованая сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 540 | 520 | 451 | 432 | 412 | 412 | 412 | 402 | 392 | 392 | 383 | 353 | 304 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (53) | (46) | (44) | (42) | (42) | (42) | (41) | (40) | (40) | (39) | (36) | (31) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 167 | 157 | 157 | 147 | 147 | 147 | 137 | 128 | 118 | 118 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (17) | (16) | (16) | (15) | (15) | (15) | (14) | (13) | (12) | (12) | (11) |
| | | $A$, % | 40 | 39 | 35 | 32 | 29 | 27 | 25 | 24 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 53 | 53 | 51 | 51 | 49 | 49 | 47 | 44 |
| | То же, более 60 до 100 мм | $R_m^T$, МПа | 540 | 520 | 451 | 432 | 412 | 412 | 412 | 402 | 392 | 392 | 383 | 353 | 304 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (53) | (46) | (44) | (42) | (42) | (42) | (41) | (40) | (40) | (39) | (36) | (31) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 167 | 157 | 157 | 147 | 147 | 147 | 137 | 128 | 118 | 118 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (17) | (16) | (16) | (15) | (15) | (15) | (14) | (13) | (12) | (12) | (11) |
| | | $A$, % | 39 | 38 | 34 | 31 | 29 | 27 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 44 | 44 | 43 | 43 | 41 | 41 | 39 | 36 |
| | Горячекатаная и кованая сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной более 100 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 540 | 520 | 451 | 432 | 412 | 412 | 412 | 402 | 392 | 392 | 383 | 353 | 304 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (53) | (46) | (44) | (42) | (42) | (42) | (41) | (40) | (40) | (39) | (36) | (31) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 167 | 157 | 157 | 147 | 147 | 147 | 137 | 128 | 118 | 118 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (17) | (16) | (16) | (15) | (15) | (15) | (14) | (13) | (12) | (12) | (11) |
| | | $A$, % | 37 | 36 | 33 | 30 | 28 | 25 | 23 | 22 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| | | $Z$, % | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 43 | 42 | 42 | 40 | 40 | 39 | 36 |
| 12Х18Н9ТЛ | Отливки | $R_m^T$, МПа | 441 | 422 | 412 | 402 | 383 | 363 | 353 | 333 | 333 | 323 | 323 | 304 | 294 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (45) | (43) | (42) | (41) | (39) | (37) | (36) | (34) | (34) | (33) | (33) | (31) | (30) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 196 | 196 | 177 | 167 | 167 | 157 | 147 | 137 | 128 | 118 | 118 | 118 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (20) | (20) | (18) | (17) | (17) | (16) | (15) | (14) | (13) | (12) | (12) | (12) |
| | | $A$, % | 25 | 24 | 24 | 22 | 20 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | | $Z$, % | 32 | 32 | 32 | 30 | 30 | 27 | 27 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| 03Х16Н9М2 | Листы толщиной от 40 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 550 | 500 | 460 | 430 | 420 | 412 | 400 | 400 | 390 | 370 | 355 | 350 | 300 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (56) | (51) | (47) | (44) | (43) | (42) | (41) | (41) | (40) | (38) | (36) | (35,5) | (30,5) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 210 | 196 | 185 | 170 | 150 | 145 | 130 | 125 | 125 | 120 | 120 | 115 | 100 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (21,5) | (20) | (19) | (17,5) | (15,5) | (15) | (13,3) | (13) | (13) | (12,2) | (12,2) | (11,7) | (10,5) |
| | | $A$, % | 55 | 50 | 50 | 45 | 45 | 43 | 43 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 38 |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 | 52 | 50 | 50 | 50 |
| | Поковки (из слитка) толщиной от 180 до 500 мм | $R_m^T$, МПа | 520 | 500 | 450 | 425 | 420 | 410 | 380 | 350 | 350 | 340 | 340 | 330 | 280 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (53) | (51) | (46) | (37) | (43,5) | (42) | (39) | (35,5) | (35,5) | (34,5) | (34,5) | (33,5) | (28,5) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 200 | 186 | 180 | 175 | 140 | 130 | 125 | 110 | 110 | 105 | 100 | 100 | 95 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20,5) | (19) | (18,5) | (18) | (14,5) | (13,5) | (13) | (11,5) | (11,5) | (11) | (10,5) | (10,5) | (9) |
| | | $A$, % | 55 | 53 | 50 | 45 | 45 | 40 | 40 | 38 | 38 | 38 | 35 | 35 | 35 |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| | | $Z$, % | 55 | 55 | 55 | 55 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 48 | 47 | 47 | 47 |
| 08Х16Н11М3 | Листы толщиной от 6 до 50 мм | $R_m^T$, МПа | 510 | 491 | 441 | 422 | 412 | 402 | 402 | 392 | 392 | 392 | 373 | 363 | 343 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (52) | (50) | (45) | (43) | (42) | (41) | (41) | (40) | (40) | (40) | (38) | (37) | (35) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 206 | 196 | 196 | 167 | 157 | 157 | 147 | 147 | 137 | 137 | 128 | 118 | 118 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (21) | (20) | (20) | (17) | (16) | (16) | (15) | (15) | (14) | (14) | (13) | (12) | (12) |
| | | $A$, % | 50 | 43 | 37 | 35 | 33 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 30 | 30 | 30 |
| | | $Z$, % | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| 10Х17Н13М2Т | Заготовки в виде поковок и штамповок из слитков массой не более 15 т, листы и листовые штамповки, кованно-катаные заготовки толщиной до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 510 | 491 | 432 | 412 | 392 | 392 | 353 | 353 | 333 | 333 | 323 | 304 | 255 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (52) | (50) | (44) | (42) | (40) | (40) | (36) | (36) | (34) | (34) | (33) | (31) | (26) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 186 | 186 | 186 | 177 | 177 | 177 | 177 | 147 | 147 | 118 | 118 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (19) | (19) | (19) | (18) | (18) | (18) | (18) | (15) | (15) | (12) | (12) | (11) |
| | | $A$, % | 37 | 36 | 33 | 29 | 27 | 25 | 23 | 22 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 48 | 48 | 47 | 47 | 45 | 45 | 43 | 40 |
| | То же, более 60 до 300 мм | $R_m^T$, МПа | 510 | 491 | 432 | 412 | 392 | 392 | 353 | 353 | 333 | 333 | 323 | 304 | 255 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (52) | (50) | (44) | (42) | (40) | (40) | (36) | (36) | (34) | (34) | (33) | (31) | (26) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 186 | 186 | 186 | 177 | 177 | 177 | 177 | 147 | 147 | 118 | 118 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (19) | (19) | (19) | (18) | (18) | (18) | (18) | (15) | (15) | (12) | (12) | (11) |
| | | $A$, % | 33 | 32 | 29 | 26 | 24 | 22 | 20 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 38 | 38 | 38 | 36 | 36 | 34 | 32 |
| | Листы толщиной от 0,5 до 160 мм | $R_m^T$, МПа | 530 | 510 | 451 | 432 | 412 | 412 | 363 | 363 | 343 | 343 | 333 | 314 | 265 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (54) | (52) | (46) | (44) | (42) | (42) | (37) | (37) | (35) | (35) | (34) | (32) | (27) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 235 | 226 | 226 | 226 | 216 | 216 | 216 | 216 | 177 | 177 | 137 | 137 | 137 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (24) | (23) | (23) | (23) | (22) | (22) | (22) | (22) | (18) | (18) | (14) | (14) | (14) |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12Х18Н12М3ТЛ | Отливки | $A$, % | 37 | 36 | 32 | 29 | 27 | 25 | 22 | 22 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 38 | 38 | 38 | 38 | 36 | 36 | 34 | 32 |
| | | $R_m^T$, МПа | 500 | 480 | 450 | 425 | 400 | 380 | 360 | 340 | 328 | 316 | 304 | 292 | 280 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (51) | (49) | (46) | (43) | (41) | (38,7) | (36,7) | (34,7) | (33,5) | (32,2) | (31) | (29,8) | (28,6) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 216 | 196 | 170 | 165 | 160 | 155 | 150 | 140 | 138 | 136 | 134 | 132 | 130 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (22) | (20) | (17,3) | (16,8) | (16,3) | (15,8) | (15,3) | (14,2) | (14) | (13,8) | (13,6) | (13,5) | (13) |
| 10Х18Н12М3Л | Отливки | $A$, % | 30 | 28 | 27 | 25 | 23 | 21 | 19 | 16 | 15 | 14 | 14 | 13 | 12 |
| | | $R_m^T$, МПа | 392 | 385 | 374 | 363 | 351 | 340 | 328 | 317 | 306 | 294 | 282 | 270 | 258 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (40) | (39) | (38) | (37) | (35,8) | (34,7) | (33,5) | (32,3) | (31,2) | (30) | (29) | (27,5) | (26) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 196 | 191 | 182 | 173 | 164 | 155 | 146 | 137 | 127 | 118 | 114 | 112 | 108 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (20) | (19,5) | (18,6) | (17,7) | (16,7) | (15,8) | (14,9) | (14) | (13) | (12) | (11,6) | (11,4) | (11) |
| 10Х17Н13М2Т | Трубы бесшовные горячедеформированные диаметром от 57 до 325 мм, с толщиной стенки от 3,5 до 32 мм, холодно- и теплодеформированные диаметром от 5 до 250 мм, с толщиной стенки от 0,2 до 22 мм | $A$, % | 20 | 20 | 19 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 |
| | | $Z$, % | 25 | 25 | 24 | 23 | 23 | 22 | 22 | 21 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | | $R_m^T$, МПа | 530 | 510 | 451 | 432 | 412 | 412 | 363 | 363 | 343 | 343 | 333 | 314 | 314 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (54) | (52) | (46) | (44) | (42) | (42) | (37) | (37) | (35) | (35) | (34) | (32) | (32) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 343 | 333 | 333 | 333 | 314 | 314 | 314 | 314 | 255 | 255 | 196 | 196 | 196 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (35) | (34) | (34) | (34) | (32) | (32) | (32) | (32) | (26) | (26) | (20) | (20) | (20) |
| | | $A$, % | 35 | 34 | 30 | 27 | 26 | 24 | 21 | 21 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | | $Z$, % | 50 | 50 | 50 | 50 | 49 | 48 | 47 | 46 | 45 | 44 | 43 | 41 | 36 |
| 09Х16Н15М3Б | Заготовка трубная диаметром от 80 до 180 мм | $R_m^T$, МПа | 540 | 520 | 500 | 471 | 451 | 432 | 432 | 412 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (55) | (53) | (51) | (48) | (46) | (44) | (44) | (42) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 245 | 235 | 235 | 226 | 226 | 226 | 196 | 186 | 167 | 167 | 167 | 167 | 167 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (25) | (24) | (24) | (23) | (23) | (23) | (20) | (19) | (17) | (17) | (17) | (17) | (17) |
| 45Х14Н14В2М | Горячекатаная и кова- | $A$, % | 35 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 27 | 27 | 25 | 23 | 22 | 22 | 22 |
| | | $R_m^T$, МПа | 706 | 667 | 638 | 608 | 598 | 589 | 569 | 549 | 549 | 540 | 530 | 520 | — |
| | | (кгс/мм$^2$) | (72) | (68) | (65) | (62) | (61) | (60) | (58) | (56) | (56) | (55) | (54) | (53) | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 45Х14Н14В2М | ная сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной до 60 мм, калиброванная сталь диаметром или стороной квадрата до 70 мм | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 314 (32) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | 275 (28) | 265 (27) | 245 (25) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 216 (22) | — |
| | | $A$, % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 17 | 15 | 14 | 13 | 12 | — |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 32 | 30 | 27 | 23 | — |
| | Горячекатаная и кованая сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной свыше 60 до 100 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 706 (72) | 667 (68) | 638 (65) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 569 (58) | 549 (56) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 314 (32) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | 275 (28) | 265 (27) | 245 (25) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 216 (22) | — |
| | | $A$, % | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 16 | 14 | 13 | 12 | 11 | — |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 27 | 26 | 23 | 20 | — |
| | То же, более 100 до 150 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 706 (72) | 667 (68) | 638 (65) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 569 (58) | 549 (56) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 520 (53) | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 314 (32) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) | 275 (28) | 265 (27) | 245 (25) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 216 (22) | — |
| | | $A$, % | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | — |
| | | $Z$, % | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 21 | 19 | 16 | — |
| Х18Н22В2Т2 | Поковки из слитков массой до 10 т | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 657 (67) | 638 (65) | 628 (64) | 608 (62) | 598 (61) | 589 (60) | 589 (60) | 569 (58) | 559 (57) | 549 (56) | 540 (55) | 530 (54) | 530 (54) |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 343 (35) | 343 (35) | 343 (35) | 323 (33) | 323 (33) | 323 (33) | 323 (33) | 323 (33) | 323 (33) | 314 (32) | 294 (30) | 294 (30) | 294 (30) |
| | | $A$, % | 17 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 10 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 31Х19Н9МВБТ | Заготовки крепежных деталей неограниченной толщины, КП315* | $Z$, % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 18 | 16 | 15 |
| | | $R_m^T$, МПа | 589 | 589 | 569 | 549 | 530 | 510 | 491 | 471 | 441 | 441 | 412 | 392 | 392 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (58) | (56) | (54) | (52) | (50) | (48) | (45) | (45) | (42) | (40) | (40) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 315 | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 | 314 | 294 | 284 | 275 | 275 | 265 | 196 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (32) | (32) | (32) | (32) | (32) | (32) | (32) | (30) | (29) | (28) | (28) | (27) | (20) |
| | | $A$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 28 | 27 | 26 | 26 | 25 | 19 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Горячекатаная и кованая сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 589 | 589 | 569 | 549 | 530 | 510 | 491 | 471 | 441 | 441 | 412 | 392 | 392 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (58) | (56) | (54) | (52) | (50) | (48) | (45) | (45) | (42) | (40) | (40) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 275 | 275 | 265 | 265 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (28) | (28) | (27) | (27) |
| | | $A$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 28 | 27 | 26 | 26 | 25 | 19 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | То же, более 60 до 100 мм | $R_m^T$, МПа | 589 | 589 | 569 | 549 | 530 | 510 | 491 | 471 | 441 | 441 | 412 | 392 | 392 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (58) | (56) | (54) | (52) | (50) | (48) | (45) | (45) | (42) | (40) | (40) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 275 | 275 | 265 | 265 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (28) | (28) | (27) | (27) |
| | | $A$, % | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 27 | 26 | 25 | 25 | 24 | 18 |
| | | $Z$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| | То же, более 100 до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 589 | 589 | 569 | 549 | 530 | 510 | 491 | 471 | 441 | 441 | 412 | 392 | 392 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (58) | (56) | (54) | (52) | (50) | (48) | (45) | (45) | (42) | (40) | (40) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 275 | 275 | 265 | 265 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (28) | (28) | (27) | (27) |
| | | $A$, % | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 25 | 24 | 23 | 23 | 22 | 17 |
| | | $Z$, % | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 10Х11Н20Т3Р | Горячекатаная и кованая сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной более 60 до 100 мм | $R_m^T$, МПа | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 834 | 834 | 834 | 804 | 785 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (85) | (85) | (85) | (82) | (80) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 559 | 540 | 520 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (57) | (55) | (53) |
| | | $A$, % | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | | $Z$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | То же, более 100 до 150 мм | $R_m^T$, МПа | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 834 | 834 | 834 | 804 | 785 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (85) | (85) | (85) | (82) | (80) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 559 | 540 | 520 |
| | | (кгс/мм$^2$) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (57) | (55) | (53) |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 10Х11Н20Т3Р | Заготовки крепежных деталей, КП490* | $A$, % | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | | $Z$, % | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| | | $R_m^T$, МПа | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 785 | 785 | 785 | 755 | 736 |
| | | (кгс/мм²) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (80) | (80) | (80) | (77) | (75) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 490 | 490 | 490 | 490 | 471 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (50) | (50) | (50) | (50) | (48) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) |
| | | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 12 |
| | | $Z$, % | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | Сортовой прокат, КП490* | $R_m^T$, МПа | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 834 | 785 | 785 | 785 | 755 | 736 |
| | | (кгс/мм²) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (85) | (80) | (80) | (80) | (77) | (75) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 490 | 490 | 490 | 490 | 490 | 490 | 471 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 |
| | | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (50) | (50) | (50) | (50) | (48) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) |
| | | $A$, % | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 17 | 17 | 17 | 16 | 16 | 14 | 14 | 14 |
| | | $Z$, % | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | Горячекатаная и кованая сталь диаметром, стороной квадрата или толщиной до 60 мм | $R_m^T$, МПа | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 834 | 834 | 834 | 804 | 785 |
| | | (кгс/мм²) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (85) | (85) | (85) | (82) | (80) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 559 | 540 | 520 |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (57) | (55) | (53) |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | | $Z$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 1Х16Н36МБТЮР | Любой | $R_m^T$, МПа | 785 | 765 | 755 | 746 | 736 | 736 | 736 | 726 | 706 | 706 | 687 | 687 | — |
| | | (кгс/мм²) | (80) | (78) | (77) | (76) | (75) | (75) | (75) | (74) | (72) | (72) | (70) | (70) | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | — |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | — |
| | | $A$, % | 20 | 18 | 17 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | — |
| | | $Z$, % | 25 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | — |
| 03Х21Н32М3Б | Прутки, поковки | $R_m^T$, МПа | 539 | 539 | 539 | 539 | 539 | 491 | 490 | 441 | 441 | 441 | 441 | 392 | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (55) | (55) | (55) | (55) | (50) | (50) | (45) | (45) | (45) | (45) | (40) | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 196 | 196 | 167 | 167 | 167 | 147 | 147 | — |
| | | (кгс/мм²) | (22) | (22) | (22) | (22) | (22) | (20) | (20) | (17) | (17) | (17) | (15) | (15) | — |
| | | $A$, % | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | — |
| | | $Z$, % | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | — |
| | Трубы | $R^T_m$, МПа | 539 | 539 | 539 | 539 | 539 | 491 | 491 | 441 | 441 | 441 | 441 | 392 | — |
| | | (кгс/мм²) | (55) | (55) | (55) | (55) | (55) | (50) | (50) | (45) | (45) | (45) | (45) | (40) | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 216 | 196 | 196 | 196 | 196 | 176 | 157 | — |
| | | (кгс/мм²) | (22) | (22) | (22) | (22) | (22) | (22) | (20) | (20) | (20) | (20) | (18) | (16) | — |
| | | $A$, % | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 25 | — |
| Сплав ХН35ВТ | Заготовки | $R^T_m$, МПа | 736 | 716 | 686 | 676 | 666 | 657 | 657 | 647 | 638 | 617 | 598 | 568 | 539 |
| | крепежных деталей толщиной до 400 мм | (кгс/мм²) | (75) | (73) | (70) | (69) | (68) | (67) | (67) | (66) | (65) | (63) | (61) | (58) | (55) |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 395 | 395 | 373 | 363 | 353 | 353 | 353 | 353 | 353 | 353 | 353 | 343 | 333 |
| | | (кгс/мм²) | (40) | (40) | (38) | (37) | (36) | (36) | (36) | (36) | (36) | (36) | (36) | (35) | (34) |
| | и от 620 до | $A$, % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 13 | 12 | 10 |
| | 650 мм, | $Z$, % | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 24 | 23 | 22 | 20 | 18 |
| | КП395,* сортовой прокат толщиной до 100 мм | | | | | | | | | | | | | | |
| Сплав ХН35ВТ-ВД | Кованый | $R^T_m$, МПа | 834 | 814 | 804 | 785 | 785 | 765 | 755 | 746 | 736 | 736 | 736 | 706 | 667 |
| | и горячекатаный пруток | (кгс/мм²) | (85) | (83) | (82) | (80) | (80) | (78) | (77) | (76) | (75) | (75) | (75) | (72) | (68) |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 491 | 491 | 461 | 451 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 412 |
| | диаметром от | (кгс/мм²) | (50) | (50) | (47) | (46) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (42) |
| | 40 до 200 мм, | $A$, % | 18 | 17 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 12 |
| | сортовой прокат до 100 мм | $Z$, % | 40 | 38 | 37 | 35 | 34 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 27 |
| Сплав ХН35ВТЮ | Любой | $R^T_m$, МПа | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 | 883 |
| | | (кгс/мм²) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) | (90) |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 589 | 579 |
| | | (кгс/мм²) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (60) | (59) |
| | | $A$, % | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | | $Z$, % | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Сплав 0Х20Н46Б | Бесшовные трубы холодно- и теплодеформированные наружным диамет- | $R^T_m$, МПа | 520 | 510 | 510 | 491 | 451 | 441 | 441 | 441 | 441 | 441 | 432 | 422 | 392 |
| | | (кгс/мм²) | (53) | (52) | (52) | (50) | (46) | (45) | (45) | (45) | (45) | (45) | (44) | (43) | (40) |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа | 196 | 186 | 186 | 177 | 167 | 167 | 167 | 157 | 157 | 157 | 157 | 157 | 147 |
| | | (кгс/мм²) | (20) | (19) | (19) | (18) | (17) | (17) | (17) | (16) | (16) | (16) | (16) | (16) | (15) |
| | | $A$, % | 26 | 25 | 24 | 24 | 24 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22 | 21 | 21 | 21 |
| | | $Z$, % | | | | | | | | | | | | | |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| Сплав 0Х20Н46Б | ром от 13 до 32 мм, толщиной стенки от 1,5 до 3 мм | | | | | | | | | | | | | | |
| | Прутки круглого и квадратного сечения толщиной или диаметром от 30 до 170 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 540 (55) | 530 (54) | 530 (54) | 510 (52) | 471 (48) | 461 (47) | 461 (47) | 461 (47) | 461 (47) | 461 (47) | 451 (46) | 441 (45) | 412 (42) |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 186 (19) | 177 (18) | 177 (18) | 177 (18) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 157 (16) |
| | | $A$, % | 30 | 29 | 28 | 28 | 28 | 26 | 26 | 26 | 26 | 25 | 24 | 24 | 24 |
| Циркониевые: цирконий + 2,5% ниобия | Бесшовные холоднокатаные трубы толщиной до 9 мм | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 392 (40) | 392 (40) | 373 (38) | 353 (36) | 343 (35) | 333 (34) | 323 (33) | 294 (30) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 245 (25) | 235 (24) | 226 (23) | 216 (22) | 206 (21) | 196 (20) | 196 (20) | 167 (17) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 18 | 17 | 17 | 16 | 16 | 15 | 15 | 15 | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 53 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 60 | — | — | — | — | — |
| | | $\alpha$, мкК$^{-1}$ | — | 5,2 | 5,4 | 5,6 | 5,7 | 5,9 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $E^T$, ГПа ($E^T$, $10^4$ кгс/мм²) | 88,3 (0,90) | 86,3 (0,88) | 84,3 (0,86) | 81,4 (0,83) | 78,5 (0,80) | 75,5 (0,77) | 76,2 (0,74) | — | — | — | — | — | — |
| Цирконий +1% ниобия | Трубы бесшовные холоднокатаные диаметром от 9 до 13,5 мм в поперечном направлении | $R_m^T$, МПа (кгс/мм²) | 272 (27,7) | 262 (27) | 245 (25) | 227 (23) | 208 (21) | 190 (19,4) | 168 (17) | 145 (14,8) | — | — | — | — | — |
| | | $R_{p0,2}^T$, МПа (кгс/мм²) | 204 (20,8) | 197 (20) | 187 (19) | 175 (18) | 173 (17) | 154 (16) | 143 (14,5) | 127 (13) | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 28 | 28,4 | 29 | 29,5 | 30 | 31 | 32 | 33 | — | — | — | — | — |
| Титан | Листы | $R_m^T$, МПа | 294 | 265 | 235 | 196 | 157 | 137 | — | — | — | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ВТ1-0, ВТ1-0(М) | толщиной от 0,3 до 10 мм, поковки, штамповки, прутки диаметром до 100 мм, трубы | (кгс/мм$^2$) | (30) | (27) | (24) | (20) | (16) | (14) | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 216 (22) | 196 (20) | 167 (17) | 147 (15) | 118 (12) | 98 (10) | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 24 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $Z$, % | 45 | 40 | 35 | 35 | 40 | 50 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $\alpha$, мкК$^{-1}$ | — | 7,8 | 7,8 | 8,0 | 8,3 | 8,5 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $E^T$, ГПа | 108 | 104 | 102 | 98 | 96 | 93 | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($E^T$, 10$^4$ кгс/мм$^2$) | (1,10) | (1,06) | (1,04) | (1,00) | (0,98) | (0,95) | — | — | — | — | — | — | — |
| Алюминиевый сплав АМг3 | Плиты толщиной от 12 до 80 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 167 (17) | 147 (15) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 59 (6) | 59 (6) | 59 (6) | 59 (6) | 59 (6) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $\alpha$, мкК$^{-1}$ | — | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 25,0 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $E^T$, ГПа | 68,7 | 67,7 | 66,7 | 65,7 | 62,8 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($E^T$, 10$^4$ кгс/мм$^2$) | (0,70) | (0,69) | (0,68) | (0,67) | (0,64) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Алюминиевый сплав АВ | Плиты толщиной от 12 до 80 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 167 (17) | 167 (17) | 157 (16) | 157 (16) | 137 (14) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 10 | 10 | 12 | 12 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $\alpha$, мкК$^{-1}$ | — | 22,1 | 22,1 | 22,1 | 24,1 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $E^T$, ГПа | 68,7 | 67,7 | 66,7 | 65,7 | 63,7 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($E^T$, 10$^4$ кгс/мм$^2$) | (0,7) | (0,69) | (0,68) | (0,67) | (0,65) | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Алюминиевый сплав АД0, АД1 | Листы толщиной от 0,3 до 10,5 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 59 (6) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Плиты толщиной от 11 до 25 мм, более 25 до 80 мм | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 78 (8) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 18 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $R^T_m$, МПа (кгс/мм$^2$) | 63 (6) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 15 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Трубы | $R^T_m$, МПа | 59 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

*Продолжение табл. П1.1*

| Марка стали или сплава | Сортамент | Характеристика | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| Алюминиевый сплав АД0, АД1 | прессованные диаметром от 18 до 90 мм | ($кгс/мм^2$) | (6) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Алюминиевый сплав САВ-1 | Прутки диаметром до 50 мм, поковки, листы и плиты толщиной до 200 мм | $R_m^T$, МПа | 176 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($кгс/мм^2$) | (18) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 12 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Сплав латуни ЛО62-1 | Листы холоднокатаные | $R_m^T$, МПа | 390 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($кгс/мм^2$) | (40) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | Листы горячекатаные | $R_m^T$, МПа | 340 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($кгс/мм^2$) | (35) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A_5$, % | 20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Сплав латуни ЛО70-1 | Трубы диаметром от 10 до 50 мм | $R_m^T$, МПа | 294 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | ($кгс/мм^2$) | (30) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | | $A$, % | 40 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Таблица П1.2. **Температурный коэффициент линейного расширения конструкционных материалов $\alpha^t$, мкК$^{-1}$**

| Группа стали и сплава | Марка стали и сплава | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 1 | Ст3сп5, 10, 15, 15Л, 20, 20Л, 20К, 22К, 25, 25Л, 30, 35, 40, 45, 20Х, 30Х, 35Х, 40Х, 45Х, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ, 20ХМА, 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 30ХМ, 30ХМА, 35ХМ, 35ХМА, 10Х2М, 12Х2М, 12МХ, 30ХГСА, 12Х1МФ, 25Х1МФ, 15Х1М1Ф, 15Х1М1ФЛ, 12Х2МФА, 12Х2МФА-А, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 18Х2МФА, 25Х2МФА, 25Х2М1Ф, 25Х3МФА, 10Х2М1ФБ, 20Х1М1Ф1БР, 38ХН3МФА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 36Х2Н2МФА, 15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А, 10ХСНД, 10ХН1М, 15ГС, 16ГС, 20ГСЛ, 09Г2С, 16ГНМА, 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ | 11,5 | 11,9 | 12,2 | 12,5 | 12,8 | 13,1 | 13,4 | 13,6 | 13,8 | 14,0 | 14,2 | 14,4 |
| 2 | 08Х13, 20Х13, 30Х13, 09Х17Н, 1Х12В2МФ, 14Х17Н2, 20Х12ВНМФ, 18Х12ВМБФР, 05Х12Н2М-ВИ, 05Х12Н2М, 05Х12Н2М-ВД, 06Х12Н3Д, 06Х12Н3ДЛ, 08Х14МФ, 06Х13Н7Д2, 07Х16Н4Б | 10,0 | 10,3 | 10,6 | 10,8 | 11,0 | 11,2 | 11,4 | 11,5 | 11,7 | 11,8 | 11,9 | 12,0 |
| 3 | 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х18Н10Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н9ТЛ, 03Х16Н9М2, 08Х16Н11М3, 10Х17Н13М2Т, 10Х18Н12М3Л, 12Х18Н12М3ТЛ, 09Х16Н15М3Б, 45Х14Н14В2М, Х18Н22В2Т2, 31Х19Н9МВБТ, 10Х11Н20Т3Р, 1Х16Н36МБТЮР, ХН35ВТЮ, ХН35ВТ-ВД, ХН35ВТ, 03Х21Н32М3Б, 0Х20Н46Б | 16,4 | 16,6 | 16,8 | 17,0 | 17,2 | 17,4 | 17,6 | 17,8 | 18,0 | 18,2 | 18,4 | 18,5 |

Таблица П1.3. **Модуль упругости конструкционных материалов $E$, ГПа ($E$, $10^4$ кгс/мм$^2$)**

| Группа стали и сплава | Марка стали и сплава | Температура, К (°С) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 293 (20) | 323 (50) | 373 (100) | 423 (150) | 473 (200) | 523 (250) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
| 1 | Ст3сп5, 10, 15, 15Л, 20, 20Л, 25, 25Л, 20К, 22К | 200 (2,04) | 197 (2,01) | 195 (1,99) | 192 (1,96) | 190 (1,94) | 185 (1,88) | 180 (1,84) | 175 (1,79) | 170 (1,73) | 165 (1,68) | 160 (1,63) | — — | — — |
| 2 | 30, 35, 40, 45 | 210 (2,14) | 207 (2,11) | 205 (2,09) | 200 (2,04) | 195 (1,99) | 190 (1,94) | 185 (1,88) | 180 (1,84) | 175 (1,79) | 167 (1,70) | 160 (1,63) | — — | — — |
| 3 | 20Х, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ, 20ХМА, 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 10Х2М, 12Х2М, 12МХ, 12Х1МФ, 10Х2М1ФБ, 15Х1М1Ф, 15Х1М1ФЛ, 12Х2МФА, 12Х2МФА-А, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 18Х2МФА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А, 10ХН1М, 10ХСНД, 15ГС, 16ГС, 09Г2С, 20ГСЛ, 16ГНМА, 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ, 06Х12Н3Д, 06Х12Н3ДЛ, 20Х1М1Ф1БР | 210 (2,14) | 207 (2,11) | 205 (2,09) | 202 (2,06) | 200 (2,04) | 197 (2,01) | 195 (1,99) | 190 (1,94) | 185 (1,88) | 180 (1,84) | 175 (1,79) | 170 (1,73) | 165 (1,68) |
| 4 | 30Х, 35Х, 40Х, 45Х, 30ХМ, 30ХМА, 35ХМ, 35ХМА, 30ХГСА, 25Х1МФ, 25Х2МФА, 25Х2М1Ф, 25Х3МФА, 36Х2Н2МФА, 38ХН3МФА, 07Х16Н4Б | 215 (2,19) | 212 (2,16) | 210 (2,14) | 207 (2,11) | 205 (2,09) | 202 (2,06) | 200 (2,04) | 195 (1,99) | 190 (1,94) | 185 (1,88) | 180 (1,84) | 175 (1,79) | 170 (1,73) |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 08Х13, 20Х13, 30Х13, 14Х17Н2, 18Х12ВМБФР, 08Х14МФ, 20Х12ВНМФ, 09Х17Н, 1Х12В2МФ, 05Х12Н2М-ВИ, 05Х12Н2М, 05Х12Н2М-ВД | 220 (2,24) | 217 (2,16) | 215 (2,19) | 212 (2,16) | 210 (2,14) | 205 (2,09) | 200 (2,04) | 195 (1,99) | 190 (1,94) | 185 (1,88) | 180 (1,84) | 175 (1,79) | 170 (1,73) |
| 6 | 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н9ТЛ, 03Х16Н9М2, 08Х16Н11М3, 09Х16Н15М3Б, 06Х13Н7Д2, 10Х18Н12М3Л, 12Х18Н12М3ТЛ, 10Х17Н13М2Т, 31Х19Н9МВБТ, 45Х14Н14В2М, 0Х20Н46Б, Х18Н22В2Т2, 1Х16Н36МБТЮР, ХН35ВТ, ХН35ВТ-ВД, ХН35ВТЮ, 03Х21Н32М3Б | 205 (2,09) | 202 (2,09) | 200 (2,04) | 195 (1,99) | 190 (1,94) | 185 (1,88) | 180 (1,84) | 175 (1,79) | 170 (1,73) | 167 (1,99) | 165 (1,68) | 162 (1,65) | 160 (1,63) |
| 7 | 10Х11Н20Т3Р | 160 (1,63) | 158 (1,61) | 156 (1,59) | 153 (1,56) | 150 (1,53) | 148 (1,51) | 146 (1,49) | 143 (1,46) | 140 (1,43) | 138 (1,41) | 135 (1,38) | 133 (1,36) | 132 (1,35) |

Таблица П1.4. **Гарантированные значения пределов длительной прочности $R^T_m$, МПа (кгс/мм²)** *

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_m$, МПа (кгс/мм²) | Температура, К (°С) | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| 15ХМ | ⩾235 (24) | ⩾441 (45) | 773 (500) | 330 (33,6) | 322 (32,8) | 298 (30,4) | 278 (28,4) | 251 (25,6) | 208 (21,2) | 174 (17,7) | 146 (15,0) | 114 (11,6) | 96 (9,8) |
| 12МХ | ⩾225 (23) | ⩾411 (42) | 773 (500) | 275 (28) | 296 (27,5) | 265 (27) | 262 (26,8) | 239 (24,4) | 219 (22,4) | 166 (18,0) | 139 (14,2) | 108 (11,0) | 91 (9,3) |
| 10Х2М (48ТН-1) | ⩾245 (25) | ⩾392 (40) | 723 (450) | 296 (30) | 282 (28,8) | 266 (27,2) | 251 (25,6) | 235 (24,0) | 219 (22,4) | 204 (20,8) | 180 (18,4) | 157 (16,0) | 149 (15,2) |
| | | | 773 (500) | 255 (26) | 250 (25,6) | 227 (23,2) | 204 (20,8) | 174 (17,8) | 149 (15,2) | 126 (12,8) | 110 (11,2) | 94 (9,6) | 86 (8,8) |
| | | | 783 (510) | 255 (26,0) | 231 (23,6) | 209 (21,3) | 187 (19,1) | 161 (16,4) | 137 (14,0) | 116 (11,8) | 101 (10,3) | 86,2 (8,8) | 79,4 (8,1) |
| 12Х2М | ⩾343 (35) | ⩾539 (55) | 773 (500) | 338 (34,5) | 323 (33,0) | 309 (31,5) | 265 (27,0) | 221 (22,5) | 199 (20,3) | 162 (16,5) | 133 (13,5) | 110 (11,3) | 99 (10,1) |
| | ⩾255 (26) | ⩾451 (46) | 773 (500) | 294 (30,0) | 279 (28,5) | 257 (26,3) | 221 (22,5) | 191 (19,5) | 162 (16,5) | 133 (13,5) | 110 (11,3) | 89 (9,0) | 79 (8,0) |
| 10Х2М1ФБ (48ТН-2) | ⩾196 (20) | ⩾343 (35) | 673 (400) | 256 (26,2) | 246 (25,1) | 234 (23,9) | 229 (23,4) | 219 (22,3) | 206 (21,0) | 181 (18,4) | 163 (16,7) | 143 (14,6) | 129 (13,1) |
| | | | 723 (450) | 256 (26,2) | 242 (24,6) | 230 (23,5) | 226 (23,1) | 207 (21,2) | 193 (19,6) | 173 (17,7) | 155 (15,8) | 136 (13,9) | 129 (13,1) |
| 10Х2М1ФБ | | | 773 (500) | 193 (19,6) | 177 (18,1) | 155 (15,8) | 139 (14,2) | 125 (12,7) | 113 (11,6) | 102 (10,4) | 94 (9,6) | 83 (8,5) | 75,5 (7,7) |
| 12Х1МФ | ⩾274 (28) | ⩾441 (45) | 723 (450) | 258 (26,3) | 250 (25,6) | 236 (24,1) | 221 (22,6) | 211 (21,5) | 196 (20,0) | 179 (18,3) | 166 (16,9) | 143 (14,6) | 136 (13,9) |
| | | | 773 (500) | 258 (26,3) | 250 (25,6) | 236 (24,1) | 222 (22,6) | 204 (20,8) | 190 (19,3) | 158 (16,1) | 136 (13,9) | 107 (11,0) | 100 (10,2) |
| 15Х1М1Ф | ⩾314 (32) | ⩾490 (50) | 773 (500) | 232 (23,7) | 220 (22,4) | 213 (21,8) | 201 (20,5) | 184 (18,8) | 173 (17,6) | 154 (15,7) | 144 (14,7) | 125 (12,9) | 118 (12,0) |
| 12Х18Н9 | ⩾196 (20) | ⩾490 (50) | 673 (400) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) |
| | | | 723 (450) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 279 (28,5) | 243 (24,8) | 228 (23,3) | 206 (21) |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 773 | 279 | 265 | 257 | 242 | 221 | 199 | 184 | 162 | 147 | 140 |
| | | | (500) | (28,5) | (27) | (26,3) | (24,8) | (22,5) | (20,3) | (18,8) | (16,5) | (15) | (14,3) |
| | | | 823 | 250 | 242 | 224 | 213 | 184 | 155 | 132 | 118 | 103 | 95 |
| | | | (550) | (25,5) | (24,8) | (22,9) | (21,8) | (18,8) | (15,8) | (13,5) | (12) | (10,5) | (9,8) |
| | | | 873 | 206 | 199 | 180 | 151 | 129 | 118 | 92 | 81 | 66 | 58,5 |
| | | | (600) | (21,0) | (20,3) | (18,4) | (15,4) | (13,1) | (12) | (9,4) | (8,3) | (6,8) | (6) |
| | | | 773 | 227 | 213 | 198 | 187 | 176 | 162 | 150 | 132 | 118 | 110 |
| | | | (500) | (23,2) | (21,7) | (20,2) | (19,1) | (18,0) | (16,5) | (15,3) | (13,5) | (12) | (11,2) |
| 10X17H13M2T | ⩾196 | ⩾510 | 823 | 191 | 176 | 162 | 147 | 132 | 121 | 110 | 97 | 88 | 80 |
| | (20) | (52) | (550) | (19,5) | (18) | (16,5) | (15) | (13,5) | (12,3) | (11,2) | (9,9) | (9,0) | (8,2) |
| | | | 873 | 165 | 152 | 139 | 124 | 114 | 100 | 84 | 73,5 | 62 | 58 |
| | | | (600) | (16,8) | (15,5) | (14,2) | (12,7) | (11,6) | (10,1) | (8,6) | (7,5) | (6,3) | (5,9) |
| 12X18H10T | ⩾216 | ⩾529 | 673 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 |
| 12X18H12T | (22) | (54) | (400) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) |
| | | | 723 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 250 | 236 |
| | | | (450) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (25,5) | (24) |
| | | | 773 | 279 | 264 | 250 | 242 | 236 | 213 | 191 | 169 | 147 | 140 |
| | | | (500) | (28,5) | (27) | (25,5) | (24,8) | (24) | (21,8) | (19,5) | (17,3) | (15) | (14,3) |
| | | | 823 | 265 | 250 | 236 | 221 | 199 | 176 | 151 | 128 | 112 | 103 |
| | | | (550) | (27) | (25,5) | (24) | (22,5) | (20,3) | (18) | (15,4) | (13,1) | (11,4) | (10,5) |
| | | | 873 | 236 | 213 | 191 | 180 | 162 | 140 | 118 | 95 | 81 | 73 |
| | | | (600) | (24) | (21,8) | (19,5) | (18,4) | (16,5) | (14,3) | (12) | (9,8) | (8,3) | (7,4) |
| 08X16H11M3 | ⩾206 | ⩾510 | 673 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 | 294 |
| | (21) | (52) | (400) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) | (30) |
| | | | 723 | 279 | 279 | 279 | 279 | 279 | 265 | 257 | 235 | 220 | 213 |
| | | | (450) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (27) | (26,2) | (24) | (22,5) | (21,7) |
| | | | 773 | 279 | 279 | 279 | 257 | 242 | 227 | 212 | 183 | 165 | 147 |
| | | | (500) | (28,5) | (28,5) | (28,5) | (26,2) | (24,7) | (23,2) | (21,7) | (18,7) | (16,8) | (15,0) |
| | | | 823 | 250 | 227 | 206 | 195 | 185 | 170 | 160 | 141 | 124 | 116 |
| | | | (550) | (25,5) | (23,2) | (21) | (19,9) | (18,8) | (17,4) | (16,3) | (14,4) | (12,6) | (11,8) |
| | | | 873 | 196 | 178 | 160 | 145 | 124 | 116 | 101 | 81 | 80 | 71 |
| | | | (600) | (20,2) | (18,1) | (16,3) | (14,8) | (12,6) | (11,8) | (10,4) | (8,9) | (8,1) | (7,4) |
| XH35BT | ⩾392 | ⩾736 | 673 | 472 | 472 | 472 | 472 | 472 | 472 | 472 | 472 | 458 | 429 |
| | (40) | (75) | (400) | (48,2) | (48,2) | (48,2) | (48,2) | (48,2) | (48,2) | (48,2) | (48,2) | (46,7) | (43,8) |
| | | | 723 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 465 | 447 | 415 | 401 | 386 |
| | | | (450) | (47,5) | (47,5) | (47,5) | (47,5) | (47,5) | (47,5) | (45,6) | (42,3) | (40,9) | (39,4) |
| | | | 773 | 465 | 429 | 401 | 386 | 365 | 350 | 329 | 301 | 250 | 236 |
| | | | (500) | (47,5) | (43,8) | (40,9) | (39,4) | (37,2) | (35,8) | (33,6) | (30,7) | (25,6) | (24,1) |

*Продолжение табл. П1.4*

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_{m}$, МПа (кгс/мм²) | Температура, К (°С) | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| | | | 823 | 393 | 386 | 358 | 343 | 322 | 304 | 272 | 243 | 222 | 207 |
| | | | (550) | (40,2) | (39,4) | (36,5) | (35) | (32,9) | (30,7) | (27,7) | (24,8) | (22,6) | (21,2) |
| | | | 873 | 315 | 301 | 286 | 265 | 250 | 229 | 215 | 183 | 158 | 143 |
| | | | (600) | (32,1) | (30,7) | (29,2) | (27) | (25,6) | (23,4) | (21,9) | (18,6) | (16,1) | (14,6) |
| 09Г2С | ⩾245 | ⩾432 | 673 | 279 | 263 | 243 | 232 | 212 | 192 | 170 | 149 | 128 | 116 |
| | (25) | (44,1) | (400) | (28,5) | (26,8) | (24,8) | (23,7) | (21,6) | (19,6) | (17,3) | (15,2) | (13,1) | (11,8) |
| | | | 723 | 214 | 194 | 174 | 153 | 133 | 115 | 95,8 | 80,4 | 65 | 57 |
| | | | (450) | (21,8) | (19,8) | (17,8) | (15,6) | (13,6) | (11,7) | (9,8) | (8,2) | (6,63) | (5,82) |
| 16ГНМА | ⩾323 | ⩾490 | 673 | 392 | 392 | 392 | 382 | 376 | 354 | 336 | 304 | 280 | 256 |
| | (33) | (50) | (400) | (40) | (40) | (40) | (39,0) | (38,4) | (36,1) | (34,3) | (31) | (28,6) | (26,1) |
| | | | 723 | 350 | 346 | 342 | 335 | 325 | 303 | 271 | 236 | 194 | 170 |
| | | | (450) | (35,7) | (35,5) | (34,9) | (34,2) | (33,2) | (30,9) | (27,7) | (24,1) | (19,8) | (17,3) |
| 1Х12В2МФ | ⩾392 | ⩾588 | 773 | 263 | 242 | 225 | 204 | 188 | 173 | 161 | 146 | 131 | 125 |
| | (40) | (60) | (500) | (26,8) | (24,7) | (23) | (20,8) | (19,2) | (17,7) | (16,4) | (14,9) | (13,4) | (12,8) |
| | | | 823 | 206 | 188 | 173 | 158 | 143 | 129 | 118 | 107 | 96,8 | 90 |
| | | | (550) | (21) | (19,2) | (17,7) | (16,1) | (14,6) | (13,2) | (12) | (10,9) | (9,9) | (9,2) |
| 09Х18Н9 | ⩾196 | ⩾490 | 773 | 271 | 257 | 250 | 236 | 214 | 192 | 179 | 157 | 143 | 135 |
| (10Х18Н9) | (20) | (50) | (500) | (27,7) | (26,2) | (25,5) | (24,1) | (21,8) | (19,6) | (18,3) | (16) | (14,6) | (13,8) |
| | | | 823 | 242 | 235 | 218 | 206 | 178 | 150 | 128 | 114 | 99,8 | 92,3 |
| | | | (550) | (24,7) | (24) | (22,2) | (21) | (18,2) | (15,3) | (13,1) | (11,6) | (10,2) | (9,42) |
| | | | 873 | 200 | 193 | 174 | 146 | 125 | 114 | 89,3 | 75 | 63,8 | 57 |
| | | | (600) | (20,4) | (19,7) | (17,8) | (14,9) | (12,8) | (11,6) | (9,1) | (7,65) | (6,5) | (5,8) |
| 08Х18Н10Т | ⩾196 | ⩾490 | 773 | 280,5 | 264,7 | 249,7 | 242,2 | 231,7 | 213 | 191,2 | 182,2 | 150,7 | 139,5 |
| | (20) | (50) | (500) | (28,6) | (27) | (25,5) | (24,7) | (23,6) | (21,7) | (19,5) | (18,6) | (15,4) | (14,2) |
| | | | 823 | 243 | 228 | 220,5 | 199,5 | 183,7 | 156 | 133,5 | 108 | 90 | 81 |
| | | | (550) | (24,8) | (23,2) | (22,5) | (20,3) | (18,7) | (15,9) | (13,6) | (11) | (9,2) | (8,2) |
| | | | 873 | 207 | 191,2 | 169,5 | 150,7 | 125,2 | 106,5 | 87,7 | 73,5 | 69,7 | 62,2 |
| | | | (600) | (21,1) | (19,5) | (17,3) | (15,4) | (12,8) | (10,8) | (8,9) | (7,5) | (7,1) | (6,3) |
| 1Х16Н36МБТЮР | ⩾392 | ⩾785 | 773 | 663 | 638 | 618 | 606 | 596 | 576 | 459 | 434 | 389 | 375 |
| | (40) | (80) | (500) | (67,6) | (65,1) | (63) | (61,8) | (60,8) | (58,8) | (46,9) | (44,3) | (39,8) | (38,3) |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12Х18Н12М3ТЛ | ⩾216 (22) | ⩾491 (50) | 773 (500) | 213 (21,8) | 209 (21,4) | 206 (21) | 202 (20,6) | 199 (20,3) | 176 (18) | 162 (16,5) | 140 (14,3) | 132 (13,5) | 121 (12,4) |
| 09Х16Н15М3Б | ⩾245 (25) | ⩾540 (55) | 823 (550) | 354 (36,1) | 337 (34,4) | 323 (32,9) | 309 (31,5) | 279 (28,5) | — | — | — | — | — |
| | | | 873 (600) | 324 (33) | 294 (30) | 266 (27,1) | 246 (25,1) | 221 (22,5) | — | — | — | — | — |
| 25Х1МФ | ⩾590 (60) | ⩾736 (75) | 773 (500) | 440 (44,8) | 412 (42) | 354 (36,1) | 294 (30) | 244 (24,8) | 211 (21,5) | 191 (19,5) | 159 (16,2) | 125 (12,8) | — |
| 20ХМЛ | ⩾245 (25) | ⩾441 (45) | 773 (500) | 309 (31,5) | 301 (30,7) | 279 (28,5) | 261 (26,6) | 235 (24) | 217 (22) | 163 (16,6) | 137 (14) | 106 (11) | 90 (9,2) |
| 20ХМФЛ | ⩾294 (30) | ⩾490 (50) | 773 (500) | 331 (33,8) | 309 (31,5) | 286 (29,7) | 261 (26,6) | 228 (23,2) | 198 (20,2) | 169 (17,3) | 147 (15) | 121 (12,3) | 108 (11) |
| 15Х1М1ФЛ | ⩾314 (32) | ⩾490 (50) | 773 (500) | 232 (23,7) | 220 (22,4) | 213 (21,8) | 201 (20,5) | 184 (18,8) | 173 (17,7) | 154 (15,7) | 144 (14,7) | 126 (12,9) | 118 (12) |
| 05Х12Н2М | ⩾372 (38) | ⩾539 (55) | 723 (450) | 353 (36) | 343 (35) | 303 (31) | 294 (30) | 216 (22) | 196 (20) | 186 (19) | 186 (19) | 176 (18) | 167 (17) |
| | | | 773 (500) | 255 (26) | 255 (26) | 216 (22) | 206 (21) | 176 (18) | 157 (16) | 127 (13) | 118 (12) | 108 (11) | 98 (10) |
| | | | 823 (550) | 176 (18) | 176 (18) | 147 (15) | 137 (14) | 118 (12) | 108 (11) | 98 (10) | 88 (9) | 73 (7,5) | 69 (7) |
| 03Х16Н9М2 и ее сварные соединения, выполненные электродом ЦТ-46 | ⩾200 (20,5) | ⩾520 (53) | 723 (450) | 369 (37,6) | 359 (36,6) | 350 (35,7) | 343 (35) | 314 (32) | 294 (30) | 274 (28) | 255 (26) | 240 (24,5) | 230 (23,5) |
| | | | 773 (500) | 348 (35,5) | 325 (33,2) | 304 (31) | 284 (29) | 264 (26,9) | 244 (24,9) | 224 (22,9) | 206 (21) | 186 (19) | 175 (17,9) |
| | | | 823 (550) | 333 (34) | 309 (31,5) | 285 (29) | 237 (24) | 230 (23,5) | 206 (21) | 178 (18) | 153 (15,6) | 131 (13,4) | 119 (12) |
| | | | 873 (600) | 292 (29,8) | 265 (27) | 233 (23,8) | 205 (21) | 178 (18,1) | 154 (15,7) | 129 (13,1) | 107 (11) | 86 (8,8) | 76 (7,8) |
| 03Х21Н32М3Б | ⩾216 (22) | ⩾539 (55) | 773 (500) | 441 (45) | 441 (45) | 441 (45) | 431 (44) | 431 (44) | 421 (43) | 421 (43) | 384 (40) | 384 (40) | — — |
| | | | 823 (550) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 363 (37) | 343 (35) | 304 (31) | 255 (26) | 235 (24) | 216 (22) | — — |

* Для категории прочности материала меньше представленной в настоящей таблице характеристики жаропрочности определяют в соответствии с рекомендациями приложения 6.

Таблица П1.5. **Порядок расположения марок конструкционных материалов**

| Материал | Марка стали и сплава |
|---|---|
| Стали перлитного класса: углеродистые | Ст3сп5, 10, 15, 15Л, 20, 20Л, 20К, 22К, 25, 25Л, 30, 35, 40, 45 |
| легированные | 20Х, 30Х, 35Х, 40Х, 45Х, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ, 20ХМА, 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 30ХМ, 30ХМА, 35ХМ, 35ХМА, 10Х2М, 12Х2М, 12МХ, 30ХГСА, 10ХСНД, 10ХН1М, 16ГНМА, 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ |
| легированные хромомолибденованадиевые | 12Х1МФ, 25Х1МФ, 15Х1М1Ф, 15Х1М1ФЛ, 12Х2МФА, 12Х2МФА-А, 18Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 25Х2МФА, 25Х2М1Ф, 25Х3МФА, 10Х2М1ФБ, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А, 36Х2Н2МФА, 38ХН3МФА, 20Х1М1Ф1БР |
| легированные кремнемарганцовистые | 15ГС, 16ГС, 20ГСЛ, 09Г2С |
| Стали высоколегированные: высокохромистые | 08Х13, 20Х13, 20Х12ВНМФ, 09Х17Н, 30Х13, 14Х17Н2, 08Х14МФ, 1Х12В2МФ, 18Х12ВМБФР, 05Х12Н2М, 05Х12Н2М-ВИ, 05Х12Н2М-ВД, 06Х13Н7Д2, 06Х12Н3ДЛ, 06Х12Н3Д, 07Х16Н4Б |
| хромоникелевые коррозионно-стойкие аустенитного класса | 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н12Т, 12Х18Н9ТЛ, 03Х16Н9М2, 08Х16Н11М3, 10Х17Н13М2Т, 09Х16Н15М3Б, 12Х18Н12М3ТЛ, 10Х18Н12М3Л, 45Х14Н14В2М, Х18Н22В2Т2, 31Х19Н9МВБТ, 10Х11Н20Т3Р |
| Сплавы на железоникелевой основе | 03Х21Н32М3Б, ХН35ВТ, ХН35ВТ-ВД, ХН35ВТЮ, 1Х16Н36МБТЮР, 0Х20Н46Б |
| Сплавы цветных металлов: | |
| циркониевые | Цирконий + 2,5% ниобия, цирконий + 1% ниобия |
| титановые | ВТ1-0, ВТ1-0(М) |
| алюминиевые | АМг3, АВ, АДО, АД1, САВ-1 |
| латуни | ЛО62-1, ЛО70-1 |

*ПРИЛОЖЕНИЕ 2*
(обязательное)

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## 1. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

$\tilde{e}$ — относительная деформация ползучести
$\sigma$ — напряжение, МПа (кгс/мм$^2$)
$A_s$ — начальная площадь поперечного сечения образца, мм$^2$
$e_d$ — амплитуда деформации цикла
$2\sigma_d$ — размах напряжений в цикле, МПа
$2\epsilon_d$ — размах деформаций в цикле
$r$ — коэффициент асимметрии цикла нагружения
$\varphi_s$ — коэффициент снижения циклической прочности сварных соединений
$A_m^T$ — относительное равномерное удлинение образца, %
$A_t^T$ — относительное удлинение при длительном статическом нагружении при температуре $T$, К (°С), после разрушения, %
$Z_m^T$ — относительное равномерное сужение площади поперечного сечения образца, соответствующее $R_m^T$, %
$Z_t^T$ — относительное сужение площади поперечного сечения образца за время длительного статического нагружения $t$ при температуре $T$, К (°С), %
$T$ — температура испытания, К (°С)
$t$ — время до разрушения, ч

## 2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

2.1. Статические испытания, обработка результатов испытаний на растяжение изделий из сталей и сплавов, кроме проволоки, труб, а также ленты из листового металла толщиной менее 0,5 мм, проводятся по ГОСТ 1497—84 при температуре 293 К $\left[(20\pm\frac{15}{10})^\circ\ \text{С}\right]$, по ГОСТ 9651—84 при повышенных температурах до 1473 К (1200° С) и по ГОСТ 11150—84 при пониженных температурах.

2.2. Методы испытаний на растяжение материалов труб для определения механических характеристик при температуре 293 К $\left(20\pm\frac{15}{10}^\circ\ \text{С}\right)$ и типы образцов приводятся в ГОСТ 10006—80, при повышенных температурах — в ГОСТ 19040—81.

2.3. Начальная расчетная длина образцов из цветных сплавов для испытаний на растяжение при комнатной и повышенной температурах принимается равной $L_0=5{,}65\sqrt{A_s}$ (пятикратные образцы).

В протоколе испытаний и в сертификатах на поставляемые цветные металлы и сплавы указывается относительное удлинение ($A_5^T$), определенное на пятикратных образцах.

2.4. Дополнительно к ГОСТ 1497—84 и ГОСТ 9651—84 в случае необходимости при статических испытаниях материалов на растяжение определяют относительное равномерное сужение площади поперечного сечения образца $Z_m^T$. Относительное равномерное сужение $Z_m^T$ определяют пересчетом по относительному равномерному удлинению $A_m^T$, соответствующему максимальной нагрузке $P_b$ на диаграмме растяжения ($P-L$ или $\sigma-e$):

$$Z_m^T = A_m^T/(1+A_m^T).$$

2.5. Оценка результатов испытаний при кратковременном статическом растяжении материалов проводится в соответствии с требованиями стандартов, технических условий, чертежей и другой технической документации на материал.

## 3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

3.1. Испытания на ползучесть и определение условного предела ползучести, машины и приборы, применяемые для испытания металлов на ползучесть, формы и размеры образцов должны отвечать требованиям ГОСТ 3248—81.

3.2. При построении по результатам испытаний первичных кривых ползучести в координатах $\bar{e}-t$ участок кривой с постоянной скоростью ползучести получают обработкой данных испытаний методом наименьших квадратов. При этом в качестве независимой переменной принимают $x=t$ и зависимой $y=\bar{e}$.

3.3. Данные испытаний на ползучесть используют для построения изохронных кривых деформирования.

## 4. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

4.1. Испытания на длительную прочность, машины, применяемые для испытания металлов и сплавов на длительную прочность, нагревательные устройства и контроль температуры, типы образцов должны отвечать требованиям ГОСТ 10145—81.

4.2. По результатам испытаний устанавливают зависимости между напряжением, $A_t^T$, $Z_t^T$ и временем до разрушения, выраженные графически в логарифмических координатах.

При построении кривых длительной прочности, в частности при определении предела длительной прочности $R_{mt}^T$ экстраполяцией, могут быть использованы другие системы координат.

4.3. Кривые длительной прочности в координатах напряжение—время строятся по данным испытаний. Среднюю линию длительной прочности определяют методом наименьших квад-

ратов. В качестве зависимой случайной величины выбирается функция напряжения ($y=\lg\sigma$), независимой — время ($x=\lg t$).

4.4. Рекомендуемый метод определения характеристик жаропрочности приводится в приложении 6.

## 5. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

5.1.1. Под критической температурой хрупкости понимается температура, принимаемая за температурную границу изменения характера разрушения материала от хрупкого к вязкому. Она определяется по энергии, затрачиваемой на разрушение, в качестве показателя которой принимается ударная вязкость, и по виду излома образцов, в качестве показателя которого принимается доля вязкой составляющей в изломе или значение поперечного расширения образца в зоне излома.

5.1.2. Для определения критической температуры хрупкости проводят испытания образцов с надрезом типа V на ударный изгиб в выбранном интервале температур.

5.1.3. На основании полученных результатов испытаний строят зависимости ударной вязкости, вязкой составляющей в изломе и поперечного расширения образца от температуры испытаний.

5.1.4. По заданным критериальным значениям ударной вязкости и вязкой составляющей в изломе с использованием зависимостей по п. 5.1.3 определяют значения критической температуры хрупкости.

Средние и минимальные значения поперечного расширения образца приводятся как справочные при критической температуре хрупкости $T_к$ и температуре $(T_к+30)°$ С.

### 5.2. ОТБОР ПРОБ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

5.2.1. Для сварных соединений пробы, из которых изготавливаются образцы для определения критической температуры хрупкости, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 6996—66.

5.2.2. Для основного материала пробу отбирают от материала, прошедшего все стадии пластической деформации и термической обработки. Для материалов, для которых предусмотрен в качестве термической обработки режим отжига с постепенным охлаждением, допускается термическую обработку проводить непосредственно на пробе.

5.2.3. При отборе проб должны быть обеспечены условия, предохраняющие их от влияния нагрева и наклепа при механической обработке, или предусмотрены соответствующие припуски.

5.2.4. Пробы из поковок, листов, прутков, отливок, крепежных материалов и трубных изделий с минимальной толщиной металла более 50 мм должны быть вырезаны таким образом, чтобы продольные оси изготовляемых образцов отстояли от любой поверхности полуфабрикатов, из которых они вырезаются, на расстояние не менее 1/4 толщины металла полуфабриката в зоне вырезки проб.

5.2.5. Пробы из поковок, листов, прутков, отливок, крепежных материалов и трубных изделий с минимальной толщиной металла до 50 мм включительно должны быть вырезаны таким образом, чтобы продольные оси изготовляемых образцов могли быть расположены возможно ближе к средней (центральной) части сечения металла полуфабрикатов (стенки трубы).

5.2.6. Расстояние от края пробы до торца заготовки должно отвечать требованиям технических условий. В случае, если в технических условиях такие требования не оговорены, указанное расстояние должно быть не меньше толщины (диаметра) заготовки для заготовок с отношением толщины (диаметра) к длине менее 1/4 и не менее 1/4 толщины (диаметра) в остальных случаях.

5.2.7. В случаях, не предусмотренных пп. 5.2.4 и 5.2.5, образцы вырезаются из зон, регламентируемых соответствующей нормативно-технической документацией, а при отсутствии таких указаний — из зон, определяемых организацией, проводящей испытания.

### 5.3. ОРИЕНТАЦИЯ ОБРАЗЦОВ

5.3.1. Продольные оси образцов, вырезаемых из поковок, штамповок, листового и сортового проката, должны быть ориентированы параллельно их наружной поверхности в направлении, перпендикулярном основному направлению обработки материала (кроме направления по толщине), под которым понимается направление проката, волочения, ковки, прошивки и т. п.

Ориентация образцов из сварных соединений должна удовлетворять требованиям ГОСТ 6996—66.

5.3.2. Продольные оси образцов, вырезаемых из прутков, крепежных заготовок и труб (кроме изготовленных из листа), должны быть ориентированы вдоль их осей.

5.3.3. Продольные оси образцов, вырезаемых из отливок, должны быть ориентированы параллельно наружной поверхности.

5.3.4. Продольная ось надреза образца должна быть перпендикулярна поверхности изделия или полуфабриката.

5.3.5. В случаях, не предусмотренных в пп. 5.3.1—5.3.4, ориентация продольных осей образцов указывается в соответствующей нормативно-технической документации, а при отсутствии таких указаний определяется организацией, проводящей испытания.

### 5.4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

5.4.1. Образцы, аппаратура.

5.4.1.1. Для основного металла при испытании на ударный изгиб используются образцы типа 11 по ГОСТ 9454—78, а для сварных соединений — образцы типа IX по ГОСТ 6996—66.

5.4.1.2. Изготовляемые образцы следует маркировать с двух концов на торцах или на гранях, исключая грань, на которой наносится надрез, на расстоянии не более 15 мм от торца образца. В случае клеймения ударным способом маркировка должна наноситься до выполнения надреза.

5.4.1.3. Аппаратура для проведения испытаний и правила проведения испытаний должны соответствовать ГОСТ 9454—78.

5.4.2. Проведение испытаний.

5.4.2.1. Температурный интервал испытаний должен быть таким, чтобы в него обязательно входили точки $T_к$, $(T_к \pm 10)°$ С, $(T_к + 20)°$ С, $(T_к + 30)°$ С и $(T_к + 40)°$ С.

5.4.2.2. Если ориентировочное значение $T_{кl}$ заранее известно, допускается проводить испытания в интервале температур $(T_{кl} - 10)° \text{С} < T < (T_{кl} + 40)°$ С. Если ориентировочное значение $T_{кl}$ заранее не известно, рекомендуется определить значение ударной вязкости при 20° С и в зависимости от полученного при этой температуре значения определить интервал температур дальнейших испытаний.

5.4.2.3. При каждой температуре испытывается не менее трех образцов.

5.4.3. Обработка результатов испытаний.

5.4.3.1. Для каждого из испытываемых образцов определяют ударную вязкость, вязкую составляющую в изломе и поперечное расширение.

5.4.3.2. Ударную вязкость определяют как отношение работы разрушения образца к площади нетто — сечения образца в зоне надреза.

5.4.3.3. Значения вязкой составляющей в изломе определяют согласно ГОСТ 4543—71.

5.4.3.4. В случаях, когда определение вязкой составляющей по п. 5.4.3.3 затруднено (отсутствуют видимые границы зон хрупкого и вязкого изломов), допускается при аттестации

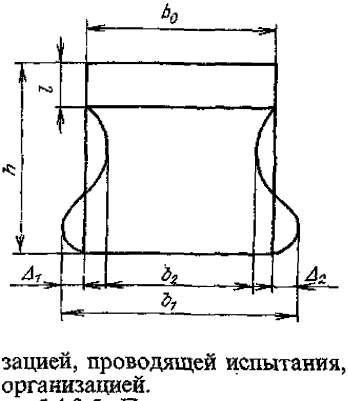



Рис. П2.1. Схема излома образца ($b_0$ — ширина образца; $l$ — глубина надреза; $h$ — высота образца)

материалов использовать другие методы определения вязкой составляющей (например, измерение площади планиметром, фрактографию и др.) и соответствующие критериальные значения вязкой составляющей в изломе.

Применяемые методы и критериальные значения вязкой составляющей в изломе должны быть согласованы организацией, проводящей испытания, с головной материаловедческой организацией.

5.4.3.5. Поперечное расширение $\Delta b$ ударного образца представляет собой остаточную (пластическую) деформацию на грани, противоположной надрезу, и измеренную в направлении надреза, как показано на рис. П2.1, и определяют по формуле

$$\Delta b = b_1 - b_0 = \Delta_1 + \Delta_2.$$

Поперечное расширение определяют на половинках разрушившихся после испытаний на ударный изгиб образцов. Измерения поперечного расширения следует производить с погрешностью $\pm 0{,}01$ мм.

5.4.3.6. Определяют среднеарифметические значения ударной вязкости и минимальные значения вязкой составляющей в изломе и поперечного расширения по данным, полученным при испытаниях трех образцов при каждой температуре испытаний. На графиках в координатах ударная вязкость — температура, вязкая составляющая в изломе — температура и поперечное расширение — температура наносят указанные значения и последовательно соединяют их прямыми линиями. Здесь же наносят точками значения ударной вязкости, волокнистости излома и поперечного расширения для каждого из испытанных образцов. Полученные графики являются исходной информацией для определения критической температуры хрупкости.

### 5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ

5.5.1. В качестве критической температуры хрупкости $T_к$ принимают температуру, для которой выполняются следующие условия.

5.5.1.1. При температуре $T_к$ среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже значений, указанных в

Таблица П2.1. **Критериальные значения ударной вязкости при температуре $T_к$, °С**

| Предел текучести при температуре 20° С $R_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | Ударная вязкость $(KCV)_п$, Дж/см$^2$ (кгс·м/см$^2$) |
|---|---|
| До 304 (31) включительно | 29 (3,0) |
| 304 (31) до 402 (41) включительно | 39 (4,0) |
| 402 (41) до 549 (56) включительно | 49 (5,0) |
| 549 (56) до 687 (70) включительно | 59 (6,0) |

Таблица П2.2. **Критериальные значения ударной вязкости при температуре $T_к$+30, °С**

| Предел текучести при температуре 20° С $R_{p0,2}$, МПа (кгс/мм$^2$) | Ударная вязкость $(KCV)_п$, Дж/см$^2$ (кгс·м/см$^2$) |
|---|---|
| До 304 (31) включительно | 44 (4,5) |
| 304 (31) до 402 (41) включительно | 59 (6,0) |
| 402 (41) до 549 (56) включительно | 74 (7,5) |
| 549 (56) до 687 (70) включительно | 89 (9,0) |

табл. П2.1, а минимальное значение ударной вязкости — не ниже 70% значений, указанных в табл. П2.1.

5.5.1.2. При температуре $(T_к+30)$° С среднеарифметическое значение ударной вязкости должно быть не ниже значений, указанных в табл. П2.2, минимальное значение ударной вязкости — не ниже 70% значений, указанных в табл. П2.2, минимальное значение вязкой составляющей в изломе — не ниже 50%.

5.5.2. Если на одном из трех испытанных образцов не будет удовлетворяться какое-либо из условий, указанных в пп. 5.5.1.1 и 5.5.1.2, допускается проведение испытаний еще трех образцов.

При этом при определении соответствия полученных результатов требованиям пп. 5.5.1.1 и 5.5.1.2 используют показания пяти образцов, за исключением образца, для которого при первом испытании были получены неудовлетворительные результаты.

5.5.3. Если при дополнительных испытаниях, указанных в п. 5.5.2, хотя бы на одном образце будут получены неудовлетворительные показатели, то за критическую температуру $T_к$ принимается ближайшая высокая температура, при которой результаты испытаний удовлетворяют требованиям пп. 5.5.1.1 и 5.5.1.2.

5.5.4. При обнаружении дефектов (в виде раковин, расслоений и т. п.) в изломе образца допускается результаты его испытания исключить из рассмотрения и испытать новый образец.

5.5.5. Порядок обработки результатов испытаний принимают следующим.

5.5.5.1. По известному значению предела текучести материала при температуре 20° С выбирают по табл. П2.1 и П2.2 соответствующие критериальные значения ударной вязкости $(KCV)_I$ и $(KCV)_{II}$. При определении $(KCV)_I$ и $(KCV)_{II}$ для зоны сплавления и околошовной зоны сварного соединения используют предел текучести основного металла.

Предел текучести определяют как среднее значение результатов испытаний трех и более образцов или как максимальное значение, если при испытаниях использовали два образца.

5.5.5.2. На графике ударная вязкость — температура на оси ординат (ось KCV) откладывают значение $(KCV)_I$. Через полученную точку проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости.

Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принимают за температуру $T_1$.

5.5.5.3. На графике ударная вязкость — температура на оси ординат откладывают значение $(KCV)_{II}$. Через полученную точку проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости.

Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принимают за температуру $T_2$.

5.5.5.4. На графике вязкая составляющая в изломе — температура на оси ординат откладывают значение $B=50\%$. Через полученную точку проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой, построенной по минимальным значениям вязкой составляющей.

Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принимают за температуру $T_2''$.

5.5.5.5. Если при выполнении требований пп. 5.5.5.2—5.5.5.4 линии, проводимые параллельно оси абсцисс, пересекают соответствующие кривые в двух и более точках, то температуры $T_1$, $T_2'$ и $T_2''$ следует определять по правым крайним точкам пересечения.

5.5.5.6. Бо́льшую из температур $T_2'$ и $T_2''$ обозначают $T_2$.

5.5.5.7. Если разница между температурами $T_2$ и $T_1$ оказывается меньше, чем 30° С, то температуру $T_1$ принимают в качестве ориентировочного значения критической температуры хрупкости $T_к^1$.

5.5.5.8. Если условие п. 5.5.5.7 не выполняется, то определяют $T_к^1$ по формуле $T_к^1 = T_2 - 30°$ С.

5.5.5.9. Проводят дополнительные испытания при температурах $(T_к^1 \pm 10)°$ С, $(T_к^1 + 20)°$ С, $(T_к^1 + 30)°$ С, $(T_к^1 + 40)°$ С, уточня-

ют кривые ударной вязкости, вязкой составляющей в изломе и в соответствии с указаниями пп. 5.5.5.2—5.5.5.8 окончательно устанавливают значение критической температуры хрупкости (если при проведении испытаний уже были определены значения KCV и $B$ при температурах, указанных в данном пункте, проведение дополнительных испытаний при этих температурах не требуется).

5.5.6. Подтверждение критической температуры хрупкости может проводиться в тех случаях, когда ее гарантированное значение $T_{кр}$ указано в нормативно-технической или конструкторской документации. При подтверждении критической температуры хрупкости испытания проводятся с соблюдением требований настоящей методики в следующей последовательности:

1) проводятся испытания при гарантированной температуре $T_{кр}$ и температуре $(T_{кр}+30)°$ С;

2) проверяется соблюдение условий п. 5.5.1.1 при температуре $T_{кр}$ и п. 5.5.1.2 при температуре $(T_{кр}+30)°$ С, при этом действуют условия пп. 5.5.2—5.5.4.

Если условия 1) и 2) выполняются, то критическая температура хрупкости считается подтвержденной.

Если требования п. 5.5.1.2 выполняются при температуре $T_{кр}$, то испытания при температуре $(T_{кр}+30)°$ С допускается не проводить.

Если требования пп. 5.5.1.1 и 5.5.1.2 при температурах $T_{кр}$ и $(T_{кр}+30)$ °С не удовлетворяются, то критическая температура хрупкости считается неподтвержденной.

## 6. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГА КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ

### 6.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

6.1.1. Сдвиг критической температуры хрупкости вследствие термического старения определяется по формуле

$$\Delta T_т = T_{кт} - T_{к0},$$

где $T_{кт}$ — критическая температура хрупкости материала, подвергавшегося термическому старению; $T_{к0}$ — критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии (до старения).

6.1.2. Определение значений $T_{к0}$ и $T_{кт}$ проводится в соответствии с указаниями разд. 5 настоящего приложения.

6.1.3. Отбор проб, требования к образцам и их изготовлению и ориентация в исследуемом полуфабрикате должны удовлетворять указаниям разд. 5 настоящего приложения.

## 6.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

6.2.1. Термическому старению подвергаются заготовки размером не менее $60 \times 13 \times 13$ мм.

6.2.2. Температуру термического старения задают в соответствии с нормативно-технической документацией на изделие или материал; она не должна быть меньше расчетной температуры или превышать ее более чем на 100° С.

6.2.3. В процессе выдержки образцов при термическом старении допускается колебание температуры в пределах $\pm 5°$ С от номинального значения температуры старения.

6.2.4. Заготовки образцов для испытаний на ударный изгиб выдерживаются при заданной температуре в течение 500, 1000, 3000, 5000, 7500 и 10 000 ч.

Для сталей, не имеющих экстремума изменения $T_{кт}$ в процессе старения при выдержке от 5000 до 10 000 ч испытания с продолжительностью выдержки 7500 ч допускается не проводить.

6.2.5. По результатам испытаний на ударный изгиб образцов, вырезанных из заготовок, подвергавшихся старению в течение различных промежутков времени, определяют значение $T_{кт}$ и в соответствии с п. 6.1.1 — значения $\Delta T_т$ на базах, указанных в п. 6.2.4.

6.2.6. Если значения $\Delta T_т$ для всех интервалов времени отрицательны, расчетное значение $\Delta T_т$ принимается равным нулю.

6.2.7. В случае монотонного, стремящегося к насыщению изменения зависимости $T_{кт}$ от времени старения, экспериментальные данные $\Delta T_т = T_{кт} - T_{к0}$ для различной продолжительности старения аппроксимируют уравнением

$$\Delta T_т = \Delta T_т^{lim} \left[1 - \exp(-pt)\right],$$

где $\Delta T_т^{lim}$, $p$ — эмпирические постоянные, определяемые с помощью методов математической статистики; $t$ — время старения.

В качестве расчетного значения $\Delta T_т$ принимают значение $\Delta T_т^{lim}$, если разница между $\Delta T_т^{lim}$ и сдвигом, полученным по формуле настоящего пункта на базе 10 000 ч, не превышает 10° С. В противном случае расчетное значение $\Delta T_т$ для длительности эксплуатации не более 100 000 ч следует определять по формуле настоящего пункта. При необходимости экстраполяции на более длительный срок следует увеличить продолжительность старения. При этом экстраполяцию допускается проводить на время, не превышающее десятикратную максимальную продолжительность старения.

6.2.8. При экстремальном характере зависимости $T_{кт}$ от времени старения в интервалах времени по п. 6.2.4 используется аппроксимация ниспадающего участка зависимости по уравнению

$$\Delta T_т = \Delta T_т^{max} \exp\left[-b(t - t_{max})\right] + c,$$

где $\Delta T_т^{max}$ — сдвиг критической температуры хрупкости в области экстремума; $t_{max}$ — время старения, при котором наблюдается экстремум (максимум); $b$, $c$ — эмпирические постоянные, определяемые с помощью методов математической статистики.

6.2.9. Если при температуре и длительности старения по пп. 6.2.2 и 6.2.4 имеет место монотонное увеличение $T_{кт}$, не стремящееся к насыщению, допускается устанавливать зависимость $T_{кт}$ от времени старения с использованием параметра Холомона по формуле

$$Hp = (T + 273)(k + \lg t) \cdot 10^{-3},$$

где $t$ — длительность старения, ч; $T$ — температура старения, °С; $k$ — эмпирическая постоянная, определяемая методами математической статистики.

При этом температура старения должна превышать установленную по п. 6.2.2 на 50° С, а длительность старения составлять 1000, 3000, 5000 ч.

Указанная в этом пункте методика применима при условии одинакового характера изменения зависимостей $T_{кт}$ при используемых температурах старения.

## 7. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГА КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

### 7.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

7.1.1. *Сдвиг* критической температуры хрупкости вследствие накопления усталостных повреждений определяется по формуле

$$\Delta T_N = T_{кN} - T_{к0},$$

где $T_{кN}$ — критическая температура хрупкости материала, подвергавшегося циклическому нагружению; $T_{к0}$ — критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии (до циклического нагружения).

7.1.2. Определение значений $T_{кN}$ и $T_{к0}$ проводится в соответствии с указаниями разд. 5 настоящего приложения.

7.1.3. Отбор проб, требования к их изготовлению и ориентации в полуфабрикате должны удовлетворять указаниям разд. 5 настоящего приложения.

7.1.4. Определение $T_{кN}$ проводят по результатам испытаний на ударный изгиб образцов, вырезаемых из рабочей части базовых образцов.

### 7.2. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

7.2.1. Для назначения режимов циклического нагружения базовых образцов используется кривая усталости исследуемого материала в диапазоне $10^3 \ldots 10^4$ циклов, получаемая при жестком нагружении.

Допускается расчетное определение кривых усталости без введения коэффициентов запаса по напряжениям и числу циклов с использованием фактических характеристик прочности и пластичности исследуемого материала.

7.2.2. Базовые образцы, изготовленные из исследуемого материала, подвергают циклическому нагружению при температуре $(20 \pm 5)^\circ$ С. Перед нагружением базовых образцов производится определение критической температуры хрупкости исследуемого материала в исходном состоянии.

7.2.3. Для циклически разупрочняющихся материалов (с соотношением $R^T_{p0,2}/R^T_m > 0{,}7$) циклическое нагружение базовых образцов проводят при осевом растяжении в мягком режиме с коэффициентом асимметрии цикла по нагрузке $r \cong 0{,}05$ до накопления остаточной осевой деформации $(2{,}5 \pm 0{,}25)\%$. При этом напряжение должно соответствовать значению, обеспечивающему накопление требуемой остаточной деформации не менее чем за $10^3$ циклов.

Допускается применять нагружение базовых образцов изгибом в мягком режиме с коэффициентом асимметрии $r \cong 0{,}05$. При этом в зоне вырезки готовых ударных образцов (в месте надреза), расположенной только в зоне остаточных деформаций растяжения, деформация металла базовых образцов должна быть на уровне $(2{,}5 \pm 0{,}25)\%$. Надрез на ударном образце следует располагать со стороны максимальной пластической деформации.

7.2.4. Для циклически стабильных и циклически упрочняющихся материалов (с соотношением $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$) назначение режимов нагружения базовых образцов производят исходя из кривой малоцикловой усталости исследуемого материала при симметричном цикле по п. 7.2.1, определяя значения амплитуд условных упругих напряжений (деформаций), соответствующих числам циклов $10^3$ и $10^4$. При указанных амплитудах напряжений (деформаций) проводят нагружение базовых образцов до накопления усталостного повреждения $a$ не менее 0,3.

Допускается проводить нагружение базовых образцов знакопеременным изгибом ($r = -1$), при этом в пределах размеров готовых образцов (в месте надреза) амплитуда деформаций не должна различаться более чем на 10%. Надрез на ударном образце следует располагать в месте наибольшего значения амплитуды деформаций.

7.2.5. Расчетный сдвиг критической температуры хрупкости определяют в соответствии с п. 7.1.1 и принимают равным

наибольшему значению, полученному в рассматриваемом диапазоне чисел циклов нагружения, напряжений (деформаций). Если окажется, что $\Delta T_N<0$, следует принять в качестве расчетной характеристики $\Delta T_N=0$.

## 8. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГА КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ

### 8.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

8.1.1. Сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния облучения определяется по формуле

$$\Delta T_F=T_{кF}-T_{кн},$$

где $\Delta T_F\geqslant 0$; $T_{кF}$ — критическая температура хрупкости материала после облучения; $T_{кн}$ — критическая температура хрупкости материала в исходном (до облучения) состоянии.

8.1.2. Коэффициент радиационного охрупчивания определяется из соотношения

$$A_F=\Delta T_F(F_n/F_0)^n,$$

где $F_n$ — перенос нейтронов с энергией $E>0{,}5$ МэВ; $F_0=10^{22}$ нейтр./м$^2$; $n$ — коэффициент.

### 8.2. ОБЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

8.2.1. Облучение образцов может производиться как в исследовательских, так и в энергетических реакторах, как в сухих ампулах, так и в потоке теплоносителя.

8.2.2. Образцы-свидетели, загружаемые в корпус ядерного энергетического реактора, размещают в герметичных контейнерах, собираемых в гирлянду.

8.2.3. При облучении образцов, загружаемых в реактор в герметичных ампулах, должен быть обеспечен надежный отвод тепла от образца с помощью наполнителей (алюминий, гелий, натрий или другие).

8.2.4. Отклонение температуры от заданной при облучении на стационарном режиме не должно превышать $\pm 10^\circ$ С.

8.2.5. При облучении образцов в герметичных ампулах непрерывный контроль температуры должен осуществляться термопарами, закрепленными на образцах точечной сваркой на их поверхности или запрессованными внутрь образца. Расстояние между термопарами определяется конструкцией облучательного устройства, но не должно быть более 200 мм.

Контроль за изменением температуры в процессе облучения должен осуществляться автоматически с записью на самопи-

щущих приборах. Погрешность показаний должна быть не более $\pm 5^{\circ}$ С. Рекомендуется устанавливать индикаторы фиксации максимальной температуры облучения, которые должны устанавливаться непосредственно на образцах.

В случае невозможности установки термопар при облучении в энергетических реакторах допускается проводить контроль максимальной температуры облучения только при помощи алмазных мониторов или плавких термоиндикаторов.

8.2.6. При облучении образцов в негерметичных ампулах температура облучения контролируется по температуре теплоносителя на входе и выходе из активной зоны или технологического канала.

8.2.7. Плотность потока быстрых нейтронов с энергией $E \geqslant 0{,}5$ МэВ по высоте размещения образцов, предназначенных для определения $\Delta T_F$ при выбранном значении переноса нейтронов, не должна различаться более чем на 15%.

8.2.8. Перенос быстрых нейтронов, воздействующих на образцы, определяется с помощью активационных индикаторов. Количество индикаторов и расстояние между ними в радиальном и осевом направлениях облучательного устройства выбирают в зависимости от его геометрии и размеров, но не менее трех (в центре и по краям). Погрешность определения переноса нейтронов должна быть не более $\pm 15\%$ измеряемой величины.

8.2.9. Отчет о проведении облучения должен содержать следующие данные:

1) номенклатуру и порядок размещения образцов в реакторе;

2) энергетический спектр нейтронов в месте размещения образцов в реакторе;

3) записи температуры образцов в процессе облучения, тип термопар и способ их крепления;

4) распределение температуры по высоте облучательного устройства за весь период облучения;

5) тип индикаторов для определения переноса нейтронов и их распределение по сечению и высоте облучательного устройства;

6) график работы реактора с остановками на планово-предупредительный ремонт (ППР);

7) давление, температуру, скорость и химический состав теплоносителя и их изменение в процессе облучения образцов;

8) приведенное к 100% мощности реактора время облучения образцов.

8.2.10. После облучения образцов в контакте с теплоносителем должно быть сделано заключение об их внешнем виде, произведен анализ содержания и распределения в образцах водорода, а также дано заключение о коррозионном воздействии теплоносителя на материал образцов.

### 8.3. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

8.3.1. Испытания на ударный изгиб образцов из материалов в исходном и облученном состояниях должны проводиться на одном и том же оборудовании.

8.3.2. Количество образцов для испытания материала в одном состоянии (облученном или необлученном) должно соответствовать количеству образцов, требуемому для определения критической температуры хрупкости согласно разд. 5 этого приложения. В случае ограниченного количества образцов из-за недостаточного объема устройств для облучения для построения одной температурной зависимости KCV допускается использовать данные испытаний меньшего количества образцов, но не менее 12.

8.3.3. Если количество облученных образцов одной серии (при одном флюенсе) является недостаточным (в силу причин, указанных в п. 8.3.2) для определения критической температуры хрупкости в полном соответствии с указаниями разд. 5 настоящего приложения, то обработку экспериментальных данных испытаний облученных и необлученных образцов проводят следующим способом:

1. Строится график зависимости ударной вязкости (KCV) от температуры испытаний $T$ с использованием уравнения

$$KCV = A + B \operatorname{th}\left[\frac{T - T_0}{C}\right],$$

где $A$ — среднее значение KCV между верхним $KCV_{max}$ и нижним $KCV_{min}$ значениями ударной вязкости; $B = (KCV_{max} - KCV_{min})/2$; $T_0$ — температура, соответствующая значению $A$; $C$ — эмпирическая константа.

Значения $A$, $B$, $C$ и $T_0$ определяют обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

На график наносят экспериментальные значения ударной вязкости для каждого из испытанных образцов.

Полученные по приведенному выше уравнению графики являются исходной информацией для определения критической температуры хрупкости.

2. По известному значению предела текучести материала в исходном состоянии (при определении значения $T_{кв}$) или после облучения (при определении значения $T_{кF}$) при температуре 20° С в соответствии со значениями, указанными в табл. П2.1, выбирается критериальное значение ударной вязкости $(KCV)_1$. При этом каждое из указанных в таблице значений предела текучести принимается как среднее значение, если для его определения использовалось не менее трех образцов, и как максимальное, если для его определения использовалось два образца

3. На графике KCV — $T$ на оси ординат (ось KCV) откладывается значение $(KCV)_1$. Через полученную точку проводится линия, параллельная оси абсцисс (ось температур), до пересечения с кривой ударной вязкости.

Температура, соответствующая точке пересечения, обозначается $T_1$.

4. На графике KCV — $T$ на оси ординат откладывается значение $1{,}5\ (KCV)_1$. Через полученную точку проводится линия, параллельная оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вязкости.

Температура, соответствующая точке пересечения, принимается за температуру $T_2$.

5. Если разность температур $T_2 - T_1$ окажется меньше 30° С, то температура $T_1$ принимается в качестве значения $T_{кu}$ или $T_{кF}$ (для исходного и облученного состояний соответственно).

6. Если условие 5 не выполняется, то в качестве $T_{кu}$ или $T_{кF}$ принимают значение $T_2 - 30°$ С.

## 9. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ

### 9.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

9.1.1. Термины и определения, используемые при проведении испытаний на усталость и обработке экспериментальных данных, устанавливаются в соответствии с ГОСТ 23207—78.

9.1.2. Определяемые характеристики сопротивления усталости используют для:

1) получения характеристик сопротивления усталостному разрушению конструкционных материалов и их сварных соединений, используемых в расчетах на циклическую прочность по настоящим нормам;

2) сравнения материалов и их сварных соединений различных химических составов, технологии их изготовления и качества;

3) обоснования выбора материалов для рассматриваемых элементов оборудования и трубопроводов.

9.1.3. Основными характеристиками, подлежащими определению по результатам испытания металлов и их сварных соединений на циклическую прочность (усталость) в малоцикловой и высокоцикловой областях, являются:

1) диаграмма статического и циклического деформирования до деформаций не менее 3% и константы уравнений кривых деформирования при их степенно́й аппроксимации;

2) кривые усталости при нагружении с заданными деформациями и константы уравнений кривых усталости при их степенно́й аппроксимации;

3) кривые усталости при нагружении с заданными усилиями и константы уравнений кривых усталости при их степенной аппроксимации;

4) предел выносливости материала при заданном числе циклов при симметричном нагружении;

5) коэффициенты снижения циклической прочности сварного соединения и металла с наплавкой $\varphi_s$;

6) кривые длительной циклической прочности конструкционных материалов и их сварных соединений;

7) коэффициент снижения циклической прочности конструкционных материалов и их сварных соединений с учетом влияния нейтронного облучения;

8) коэффициенты снижения циклической прочности конструкционных материалов и их сварных соединений с учетом влияния коррозионной среды.

9.1.4. Основные требования к экспериментальному оборудованию, форме и размерам образцов, их изготовлению и чистоте поверхности устанавливаются в соответствии с ГОСТ 25.502—79.

9.1.5. Форма и размеры образцов для испытаний выбираются с учетом формы и размеров сечений заготовок для элементов оборудования и трубопроводов АЭУ, а также целей испытаний.

Для стержневых и листовых элементов оборудования с толщиной стенки свыше 20 мм используются преимущественно цилиндрические образцы, а для тонкостенных листовых элементов оборудования с толщиной стенки до 10 мм — плоские образцы.

9.1.6. Деформацию рабочей части образцов типов II и IV по ГОСТ 25.502—79 измеряют продольными деформометрами, при этом расстояние от опор деформометра до переходной части должно быть не менее 2 мм.

9.1.7. При испытаниях образцов типов I и III по ГОСТ 25.502—79 применяются поперечные деформометры.

Определение продольной деформации производится по формулам

$$e_a=\frac{e_{apc}}{\mu_p}+\frac{e_{aec}}{\mu_e} \text{ или } e_a=\frac{e_{ac}}{\mu_p}+\frac{e_{ae}(\mu_p-\mu_e)}{\mu_p},$$

где $e_{apc}$, $e_{aec}$ — амплитуды пластической поперечной и упругой поперечной деформаций соответственно; $e_{ac}$, $e_{ae}$ — амплитуды упругопластической поперечной и упругой продольной деформаций соответственно; $\mu_p$, $\mu_e$ — коэффициент Пуассона для пластической и упругой деформаций соответственно. Допускается принимать $\mu_p=0{,}5$ и $\mu_e=0{,}3$.

9.1.8. При проведении испытаний на усталость при повышенных температурах погрешность поддержания и измерения заданной температуры рабочей части образца не должна превышать $\pm 5^\circ$ С в диапазоне температур от 50 до 600° С.

9.1.9. Оборудование для нагрева образцов должно обеспечивать нагрев рабочей части образцов типов II и IV (для образцов типов I и III участок с радиусом $R$) по ГОСТ 25.502—79 с перепадом температур по длине и диаметру (толщине) не более 5° С на 10 мм.

9.1.10. Для материала, испытываемого на усталость, должны быть получены по разд. 2 данного приложения и приложению 6 характеристики кратковременной и длительной статической прочности и пластичности при соответствующих температурах испытаний и длительности нагружения.

### 9.2. МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ

9.2.1. Основным режимом малоциклового нагружения образцов является осевое растяжение-сжатие с заданными амплитудами деформаций.

Допускается проведение испытаний при изгибе или кручении.

9.2.2. Для материалов, склонных к циклическому разупрочнению (с отношением предела текучести к пределу прочности свыше 0,7), наряду с испытаниями, указанными в п. 9.2.1, следует проводить испытания с заданной амплитудой напряжений (усилий).

9.2.3. Характеристики сопротивления малоцикловой усталости, указанные в п. 9.1, определяются по результатам испытаний серии образцов, которых должно быть:

1) не менее трех — для определения диаграмм деформирования;

2) не менее десяти — для определения кривых усталости по образованию трещин длиной от свыше 0,5 до 2,0 мм при симметричном цикле деформаций или напряжений.

9.2.4. При склонности образцов типа II и IV по ГОСТ 25.502—79 к потере устойчивости допускается сокращение длины рабочей части $l$ образцов типа II до $2d$ ($d$ — диаметр рабочей части) и типа IV до $2\sqrt{bh}$ ($b$ — высота; $h$ — толщина рабочей части плоского образца).

9.2.5. Испытания на малоцикловую усталость проводятся на воздухе:

1) при осевом растяжении-сжатии (основной вид нагружения);

2) при амплитудах напряжений выше предела текучести и соответствующих деформациях;

3) при симметричном цикле по контролируемому параметру (деформация или напряжение);

4) при числе циклов нагружения от $10^2$ до $5 \cdot 10^4$ (не менее);

5) при частоте нагружения до 1 Гц, исключающей саморазогрев образцов более чем на 30° С.

9.2.6. Порядок проведения испытаний:

1) проводятся осмотр и измерение размеров сечения рабочей части образцов с погрешностью не более 0,5% номинального размера;

2) проводятся статические испытания для определения механических свойств;

3) нулевой полуцикл нагружения образцов проводится при растяжении;

4) первый образец испытывается при амплитуде деформаций 1% (при нагружении с заданными деформациями) и деформации нулевого полуцикла 0,6% (при нагружении с заданными нагрузками);

5) последующие образцы в зависимости от результата испытания первого образца испытываются при амплитудах деформации или деформациях нулевого полуцикла, обеспечивающих приблизительно равномерное распределение (в логарифмической шкале) получаемых долговечностей в заданном диапазоне чисел циклов согласно п. 9.2.5;

6) в процессе испытаний проводится запись нагрузок и деформаций на двухкоординатном самописце в нулевом полуцикле и в циклах $10^p$, $2 \cdot 10^p$, $3 \cdot 10^p$, $5 \cdot 10^p$, где $p = 0, 1, 2, 3, 4$.

При проведении испытания с целью определения долговечности регистрируется число циклов, соответствующее моменту образования трещины по п. 9.2.3.

9.2.7. По результатам испытаний серии образцов составляется сводный протокол, включающий исходные данные (марка материала, термообработка, тип заготовки, место и ориентация вырезки образцов, форма, размеры и маркировка образца, тип машины, условия испытаний) о серии образцов, данные об амплитудах деформаций, напряжений, долговечности до образования трещин и о константах уравнений диаграмм деформирования.

9.2.8. Результаты испытаний при нагружении с заданными амплитудами деформаций каждого образца серии представляются графически в двойных логарифмических координатах:

1) $\lg e_a - \lg N$;

2) $\lg e_{ap} - \lg N$;

3) $\lg e_{эв} - \lg N$.

Указанные выше амплитуды деформаций принимаются для стабилизированного цикла или числа циклов, равного $0{,}5N$.

9.2.9. Результаты испытаний при нагружении с заданными амплитудами напряжений каждого образца серии представляются графически в координатах $\lg e_{ap} - \lg N$. При этом амплитуда пластических деформаций $e_{ap}$ устанавливается расчетом по деформации нулевого полуцикла $e_0$ по формуле

$$e_{ap} = \frac{A}{2}\left(e_0 - R_{pe}/E\right),$$

где $R_{pe}$ — предел пропорциональности в нулевом полуцикле, МПа; $E$ — модуль упругости, МПа; $A$ — коэффициент, характеризующий связь между деформацией $e_0$ и шириной петли гистерезиса $\delta_1$ в первом полуцикле нагружения и принимаемый равным среднему значению совокупности экспериментальных значений $A$ серии образцов по п. 9.2.3, определяемых по формуле

$$A = \delta_1 (e_0 - R_{pe}/E).$$

9.2.10. Построение кривых усталости по экспериментальным точкам проводится по способу наименьших квадратов.

В случаях определения только амплитуд упругопластических деформаций $e_a$ (без их разделения на упругие и пластические составляющие) построение кривых усталости допускается производить графическим интерполированием.

9.2.11. Расчетные характеристики определяются по кривым усталости:

1) по пп. 9.2.8 и 9.2.10 в пластических деформациях

$$e_{ap} (4N)^m = e_c,$$

где $m$, $e_c$ — константы уравнений, которые заносятся в сводный протокол испытаний;

2) по пп. 9.2.8 и 9.2.10 в упругих деформациях

$$e_{ae} (4N)^{m_e} = R_c/E,$$

где $m_e$, $R_c$ — константы уравнений, которые заносятся в сводный протокол испытаний;

3) по пп. 9.2.9 и 9.2.10 в пластических деформациях

$$e_{ap} N^{m_1} = e_{cb},$$

где $m_1$, $e_{cb}$ — константы уравнений, которые заносятся в сводный протокол испытаний.

9.2.12. Диаграмму циклического деформирования получают по данным испытаний при заданных амплитудах деформаций для стабилизированного цикла или числа циклов, равного 0,5 долговечности в координатах «размах деформаций $2e_a$ — размах напряжений $2\sigma_a$».

9.2.13. Показатель упрочнения кривой циклического деформирования в неупругой области получают построением кривой деформирования в двойных логарифмических координатах $\lg(2\sigma_a) - \lg(2e_a)$ как тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой:

$$2\sigma_a = (2R_{pe})^{1-\nu} (2Ee_a)^{\nu}.$$

В сводный протокол испытаний заносится значение показателя упрочнения $\nu$, полученное как среднеарифметическое не менее чем для трех образцов.

Диаграмма статического деформирования строится аналогично с заменой $2\sigma_a$, $2e_a$, $2R_{pe}$ на $\sigma_0$, $e_0$, $R_{pe}$ (напряжение и деформация нулевого полуцикла соответственно).

### 9.3. МНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ

9.3.1. Характеристики многоцикловой усталости в заданном диапазоне амплитуд напряжений (деформаций) и при заданной асимметрии получаются по результатам испытаний серии образцов, число которых должно быть не менее 12.

9.3.2. Форма и размеры образцов для испытаний выбираются с учетом формы и размеров сечений заготовок для элементов оборудования и целей испытаний.

Для стержневых и листовых элементов оборудования с толщиной стенки свыше 20 мм используются преимущественно цилиндрические образцы, для тонкостенных элементов оборудования с толщиной стенки до 10 мм — плоские образцы.

9.3.3. Основным режимом многоциклового нагружения образцов является осевое растяжение-сжатие.

9.3.4. Испытания на многоцикловую усталость проводятся на воздухе:

1) при осевом растяжении-сжатии (основной вид нагружения);

2) при симметричном цикле нагружения;

3) при числе циклов нагружения для сталей свыше $5 \cdot 10^4$ до $10^7$;

4) при частоте нагружения до 200 Гц, исключающей саморазогрев образцов более чем на 30° от заданной температуры.

9.3.5. При оценке чувствительности материала к асимметрии цикла кроме испытаний при коэффициенте асимметрии $r_\sigma(r_e) = -1$ проводятся испытания в объеме, указанном в п. 9.3.1, при значениях $r_\sigma(r_e) = 0$, где

$$r_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max} \quad (r_e = e_{min}/e_{max});$$

$\sigma_{min}(e_{min})$ — минимальное напряжение (деформация) цикла нагружения; $\sigma_{max}(e_{max})$ — максимальное напряжение (деформация) цикла нагружения.

9.3.6. Допускается проведение испытаний при изгибе с вращением образцов круглого сечения типов I и II по ГОСТ 25.502—79, при плоском изгибе образцов типов III и IV по ГОСТ 25.502—79 и при кручении образцов круглого сечения для соответствующего вида нагружения элемента конструкции.

9.3.7. Порядок проведения испытаний:

1) проводятся осмотр и измерение размеров сечения рабочей части образца с погрешностью не более 0,5% номинального размера;

2) первый образец испытывается при амплитуде напряжения $(0{,}6 \div 0{,}65)\, R_m^T$ (при нагружении с постоянной амплитудой полной деформации эту амплитуду следует принимать равной 0,4%);

3) последующие образцы (примерно 2/3 оставшегося количества) в зависимости от результата испытания первого образца испытывают при амплитудах напряжений (деформаций), обеспечивающих приблизительно равномерное распределение получаемых долговечностей $N$ до образования трещины длиной от 0,5 до 2 мм в заданном диапазоне числа циклов, указанных в п. 9.3.4;

4) предварительно обрабатывают результаты испытаний и получают кривую усталости;

5) для определения предела выносливости на базе испытаний $10^7$ циклов испытывается не менее трех образцов при амплитуде напряжений, принимаемой по предварительной кривой усталости. Если два образца из трех испытанных или не менее половины испытанных образцов не разрушаются до достижения заданного числа циклов, то данная амплитуда принимается равной пределу выносливости;

6) проводится проверка полученного значения предела выносливости испытанием одного образца при амплитуде, равной 0,95 предела выносливости, при этом образец не должен разрушиться при заданном числе циклов;

7) окончательно обрабатываются результаты испытаний и определяются характеристики многоцикловой усталости, при этом ближайшая к пределу выносливости экспериментальная точка должна быть получена при амплитуде не более 1,05 предела выносливости.

9.3.8. По результатам испытаний составляется сводный протокол, в который заносятся исходные данные (марка материала, термообработка, тип заготовки, место и ориентация вырезки образцов, форма, размеры и маркировка образца, условия испытаний) о серии образцов, данные об амплитудах напряжений (деформаций) и долговечности.

9.3.9. Результаты испытаний каждого образца представляются графически в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N$

9.3.10 Построение кривых усталости по экспериментальным точкам проводится по способу наименьших квадратов.

9.3.11 По кривой усталости определяются расчетные характеристики — предел выносливости на заданной базе и показатель степени $m_e$ кривой усталости:

$$\sigma_a N^{m_e} = R_{-1} N_0^{m_e},$$

где $N_0$ — заданное число циклов (база испытаний).

9.3.12. По результатам испытаний при асимметричном цикле по п. 9.3.5 определяется коэффициент чувствительности мате-

риала к асимметрии цикла напряжений (деформаций) по формуле

$$\psi_\sigma = \frac{\frac{2R_{-1}}{\sigma_{max}} - (1 - r_\sigma)}{1 + r_\sigma}.$$

### 9.4. ДЛИТЕЛЬНАЯ ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

9.4.1. Испытания на длительную циклическую прочность проводят по ГОСТ 25.505—85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Испытания при малоцикловом неизотермическом и термоусталостном нагружениях» на базе $2 \cdot 10^4$ ч при температуре, вызывающей наибольшее снижение длительной пластичности исследуемого материала. Характеристики длительной прочности и пластичности определяют в соответствии с требованиями разд. 4 настоящего приложения.

9.4.2. Основным видом нагружения является осевое растяжение-сжатие с заданными амплитудами деформаций.

Допускается проведение испытаний при изгибе с заданным перемещением.

9.4.3. Испытания проводят до момента образования трещины длиной от свыше 0,5 до 2 мм:

1) в малоцикловой области ($10^2$—$10^4$ циклов) при симметричном цикле нагружения ($r_\sigma = -1$);

2) в высокоцикловой области ($10^5$—$10^7$ циклов) при симметричном и пульсирующем ($r_\sigma = 0$) циклах нагружения.

9.4.4. Частоту нагружения и время выдержки при максимальной деформации цикла принимают такими, чтобы максимальная продолжительность испытаний в пределах данной серии образцов на принятой цикловой базе составляла не менее 10% длительности эксплуатации элемента конструкции, изготавливаемого из исследуемого материала.

9.4.5. Количество образцов в пределах одной серии должно быть не менее восьми (по два образца на четырех уровнях амплитуд деформаций).

9.4.6. Результаты испытаний представляют в виде кривых усталости по параметру длительности выдержки. Допускается проводить построение кривых усталости по экспериментальным точкам графическим интерполированием.

9.4.7. Расчетные характеристики длительной циклической прочности определяют, используя рекомендации приложения 7 Норм.

9.4.8. По результатам испытаний при асимметричном цикле по п. 9.4.3 определяют коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла нагружения, используя формулу п. 9.3.12.

### 9.5. ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТАЛЛА С НАПЛАВКОЙ

9.5.1. Испытания на усталость металла различных зон сварных соединений и металла с наплавкой проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502—79, ГОСТ 25.505—85 и пп. 9.1—9.4.

9.5.2. При испытании металла сварного шва продольную ось образцов *типов* II, IV по ГОСТ 25.502—79 следует располагать параллельно оси сварного соединения. Допускается использование образцов типов I и III с расположением оси образцов перпендикулярно оси сварного соединения.

Для изготовления образцов используются сварные соединения первой категории.

9.5.3. При испытании металла переходных зон (зоны сплавления и зоны термического влияния) минимальное сечение образцов *типов* I, III по ГОСТ 25.502—79 следует располагать в испытываемой зоне сварного соединения. По результатам испытаний строится кривая усталости, являющаяся нижней огибающей кривых различных зон сварного соединения.

Допускается получать кривую усталости, используя образцы типов II и IV с расположением в пределах базы измерения продольной деформации всех зон сварного соединения.

9.5.4. Определение характеристик циклической прочности металла с наплавкой проводят на образцах с сохранением наплавки в натуральную величину. При этом высота образца принимается равной $H=4B$, где $B$—толщина наплавленного слоя. Для однослойной наплавки допускается использование образцов с меньшим сечением рабочей части. При этом толщина наплавленного слоя должна быть не менее $(2\pm0,5)$ мм.

9.5.5. Для определения диаграммы циклического деформирования металла наплавки используют образец, целиком вырезанный из металла наплавленного слоя.

9.5.6. Если при испытании металла переходных зон сварных соединений циклические разрушения возникают не в рассматриваемой зоне образца, то исследуемая зона образца переносится в ту часть, где возникают разрушения.

9.5.7. При испытаниях плоских образцов с наплавкой производится фиксация зоны, в которой возникают трещины (наплавленный слой, поднаплавочная зона, основной металл).

9.5.8. По результатам испытаний на усталость основного металла в соответствии с указанными пп. 9.2—9.4, а также металла сварных соединений и металла с наплавкой определяется коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения или металла с наплавкой $\varphi_s$ при заданной долговечности $N$ по формуле

$$\varphi_s=e_{as}/e_a,$$

где $e_{as}$ — амплитуда деформации по кривой усталости сварного соединения; $e_a$ — амплитуда деформации по кривой усталости основного металла.

9.5.9. Для определения значений $\varphi_s$ используются кривые $e_a - N$, полученные по пп. 9.5.3, 9.5.4. Если полученное значение $\varphi_s > 1$, то принимается $\varphi_s = 1$.

Если в интервале чисел циклов $10^2 - 10^7$ отличие $\varphi_s$ от $\varphi_s$ при $N = 10^4$ окажется не более чем на $\pm 10\%$, то принимается минимальное значение $\varphi_s$, установленное по кривой $\varphi_s - N$. В остальных случаях значения $\varphi_s$ определяются по зависимости $\varphi_s - \sigma_a(e_a)$, которая и используется в расчетах.

9.5.10. Результаты циклических испытаний металла сварных соединений и металла с наплавкой заносятся в сводный протокол испытаний.

### 9.6. ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТАЛЛА С НАПЛАВКОЙ В КОРРОЗИОННЫХ СРЕДАХ

9.6.1. При испытаниях на циклическую прочность определяются следующие расчетные характеристики:

1) кривые усталости при малоцикловом нагружении в амплитудах упругопластических деформаций на воздухе и в среде при заданных температуре, форме цикла и частоте нагружения;

2) $\varphi_к(\varphi_{кs})$ — коэффициент коррозионного снижения циклической прочности основного металла (сварного соединения), равный отношению значения $e_a$ по кривой усталости, полученной при испытаниях в среде, к значению $e_a$ по кривой усталости, полученной при испытаниях на воздухе образцов того же типа, при долговечности $N$;

3) $\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кs})$ — минимальное значение коэффициента коррозионного снижения циклической прочности $\varphi_к(\varphi_{кs})$.

В дальнейшем используются только обозначения $\varphi_к$ и $\bar{\varphi}_к$.

9.6.2. Коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности определяются по результатам испытаний серий образцов на воздухе и в коррозионной среде в идентичных условиях по температуре испытания, материалу и размерам рабочей части образца.

9.6.3. При испытаниях используют образцы типов I—IV по ГОСТ 25.502—79. При осевом растяжении-сжатии или кручении применяют трубчатый образец, указанный на рис. П2.2.

При нагружении чистым или консольным изгибом используют образцы, рабочая часть которых показана на рис. П2.3, П2.4. Конструкция переходных зон должна исключать разрушение в их пределах.

9.6.4. При испытании образцов, содержащих в пределах рабочей части зону сплавления, измерение и регулирование деформации осуществляются, как и для однородного металла.

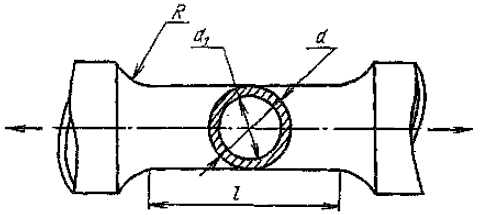



Рис. П2.2. Образец для испытаний при осевом растяжении-сжатии и кручении: $(d-d_1)/d=0{,}05\div0{,}1$; $d-d_1\geqslant1$ мм; $R\geqslant d$; $l=(3\div4)\,d$. Для образцов растяжения-сжатия $l/d$ определяется требованиями устойчивости

9.6.5. Количество образцов и требования к их изготовлению указаны в п. 9.2 настоящего приложения.

9.6.6. Образцы маркируют с обоих концов в таких местах и таким способом, чтобы не понизить сопротивление циклическому разрушению и обеспечить сохранность маркировки после испытаний.

9.6.7. Образец испытывают в состоянии, соответствующем состоянию металла в изготовленном или эксплуатируемом изделии.

9.6.8. При исследовании механизмов коррозионно-усталостного разрушения допускается предварительная обработка образцов:

1) автоклавирование;

2) окисление на воздухе при повышенных температурах;

3) выдержка при повышенной температуре с предварительной пластической деформацией или без нее;

4) провоцирующий нагрев заготовок образцов при исследовании влияния цикла сварки на основной металл в околошовной зоне.

9.6.9. При осевом растяжении-сжатии образцов измерение и контроль деформаций определяются в соответствии с ГОСТ 25.502—79.

9.6.10. Амплитуду деформации на поверхности рабочей части образца из однородного материала с постоянным прямоугольным поперечным сечением при нагружении чистым (четырехточечным) изгибом определяют по формуле

$$e_a=\Delta_a 8s/l_p^2,$$

где $\Delta_a$ — амплитуда перемещения середины рабочей части относительно средних опор, мм; $s$ — высота поперечного сечения рабочей части образца, мм; $l_p$ — длина рабочей части образца (расстояние между средними опорами), мм.

Схема нагружения чистым изгибом приведена на рис. П2.5.

При испытании образца из однородного или неоднородного материала (например, включающего различные зоны сварного

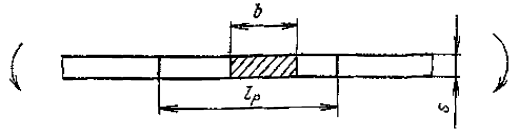



Рис. П2.3. Рабочая часть образца для испытаний при чистом изгибе: $s \geqslant 2$ мм; $l_р \geqslant 7s$; $1{,}5 \leqslant b/s \leqslant 2{,}5$

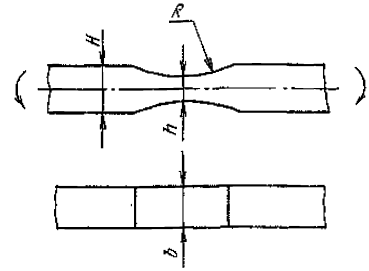



Рис. П2.4. Форма и размеры рабочей части образца для испытаний при консольном изгибе:

| $h$, мм | $b$, мм | $H/h$ | $R/h$ |
|---|---|---|---|
| 2—10 | $(2 \div 10)h$ | 1,5—2 | $\geqslant 5$ |

соединения) амплитуду деформаций в рабочей части образца допускается определять экспериментально, например методом тензометрирования.

9.6.11. Деформацию рабочей части образца допускается определять по перемещению захватов вне автоклава с использованием тарировочных зависимостей, получаемых при испытаниях на воздухе.

9.6.12. Испытательное оборудование включает контур, заполненный средой, и нагружающее устройство, которым может служить универсальная или специальная испытательная машина, обеспечивающая поддержание заданного режима нагружения, формы и характеристик цикла.

9.6.13. Испытательное оборудование должно обеспечивать:

1) измерение перемещений с погрешностью не более $\pm 3\%$ заданного значения;

2) погрешность поддержания циклических перемещений не должна превышать $\pm 5\%$ заданных значений;

3) погрешность поддержания и измерения заданной температуры не должна превышать $\pm 5°$ С в диапазоне температур 20—350° С;

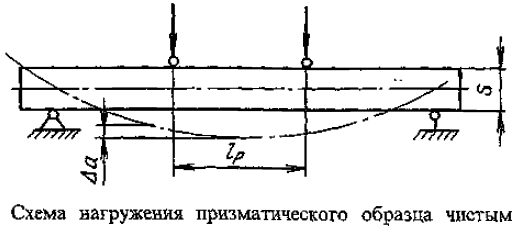



Рис. П2.5. Схема нагружения призматического образца чистым изгибом

4) контроль и поддержание давления с погрешностью не более $\pm 5\%$ заданного значения;

5) контроль и поддержание среды по значению pH = $=4{,}5 \div 10{,}5$, содержанию ионов Cl (до 10 мкг/кг) и $O_2$ (до 10 мг/кг), а также по другим составляющим, вводимым в состав реальной рабочей среды, например, при борировании или регулировании содержания кислорода с погрешностью не более $\pm 10\%$ заданного значения;

6) принудительную циркуляцию среды (допускаются испытания при естественной циркуляции);

7) фиксацию момента возникновения трещины длиной 0,5—2 мм или разрушения каждого образца в процессе работы испытательной машины.

9.6.14. Испытания проводятся:

1) при пульсирующем и симметричном циклах деформаций при осевом растяжении-сжатии или кручении цилиндрических и трубчатых образцов, чистом или консольном изгибе плоских образцов. Допускается проведение испытаний только по пульсирующему циклу;

2) при числе циклов нагружения от $10^2$ до $5 \cdot 10^4$;

3) на воздухе и в коррозионной среде при одинаковых температурах (при максимальной температуре рабочей среды в обязательном порядке). Частота (скорость) нагружения на воздухе определяется требованиями ГОСТ 25.502—79;

4) на воздухе в соответствии с ГОСТ 25.502—79;

5) в среде с выдержкой $\Delta t_0$ при максимальной деформации растяжения ($\Delta t_0 \geqslant 30$ с). Определяется $(\varphi_к)_0$ и $(\bar{\varphi}_к)_0$ при $N = 10^2$, $10^3$, $10^4$, $5 \cdot 10^4$;

6) следующие испытания на циклическую прочность в среде проводятся с увеличением выдержки $\Delta t_n = m\Delta t_0$, где $m =$ $= 5, 10, 50, \ldots$, и соответственно $n = 1, 2, 3, \ldots$;

7) испытания прекращаются, если выполняется условие $[(\bar{\varphi}_к)_{n-1} - (\bar{\varphi}_к)_n] \leqslant 0{,}1$ и на графиках зависимостей $(\varphi_к)_m$ от $\lg(\Delta\tau_m)$ при значениях $N = 10^2, 10^3, 10^4, 5 \cdot 10^4$ отмечается снижение темпа уменьшения $(\varphi_к)_m$, т. е. $\left|\dfrac{d(\varphi_к)_m}{d[\lg(\Delta t_m)]}\right|$ при возрастании $\lg(\Delta t_m)$

убывает. Зависимости $(\varphi_к)_m$ от $\lg(\Delta t_m)$ приводят в сводном протоколе испытаний;

8) при $(\bar{\varphi}_к)_n > 1$ принимают $(\bar{\varphi}_к)_n = 1$.

9.6.15. Перед испытаниями измеряют размеры поперечного сечения рабочей части образцов с погрешностью не более 0,5% номинального размера, затем образцы обезжиривают и промывают.

9.6.16. При перерыве в испытаниях на многообразцовой установке проводят осмотр всех образцов, фиксацию в протоколе размеров, числа, особенностей и мест образования трещин.

Испытания прерывают для удаления разрушенных образцов или устранения неисправностей. Время осмотра с целью обнаружения трещин на образцах, испытываемых при минимальной амплитуде деформаций, устанавливают после разрушения образцов с более высокими деформациями на основе анализа результатов испытаний, представленных в координатах $\lg e_a - \lg N$.

9.6.17. Образцы после испытаний осматривают, фиксируют число и особенности расположения трещин, подвергают металлографическому исследованию. Поверхность излома образца исследуется для установления вида разрушения.

9.6.18. В протоколе испытаний указывают:

1) номер образца (маркировку);

2) марку материала, его состояние, номер плавки;

3) ориентацию вырезки образцов, вид заготовки;

4) номер секции и ячейки, в которой размещен образец;

5) размеры сечения рабочей части (только до и после испытаний);

6) состав среды и даты ее контроля (периодичность контроля устанавливается в процессе подготовки испытаний и корректируется при их проведении);

7) температуру, давление среды;

8) максимальное и минимальное усилия (факультативно);

9) даты начала испытаний, контрольных измерений и окончания испытаний;

10) число циклов до разрушения $N_f$ и обнаружения трещины $N_c$;

11) информацию о перерывах в испытаниях, уровне нагружения образца при перерыве испытаний, изменениях режима, числе трещин и характере разрушения, о местной и общей коррозии.

9.6.19. Сводный протокол испытаний составляют по протоколам испытаний отдельных образцов серии.

9.6.20. Построение кривых усталости, полученных на воздухе и в среде, проводят в соответствии с указаниями разд. 9.2—9.5 настоящего приложения.

9.6.21. Коэффициент снижения циклической прочности $\varphi_к$ принимают равным значению $(\bar{\varphi}_к)_n$, определенному в соответствии с п. 9.6.14.

### 9.7. ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТАЛЛА С НАПЛАВКОЙ

9.7.1. Испытания облученных конструкционных материалов, их сварных соединений и наплавленного металла на циклическую прочность проводят в малоцикловой области нагружения (число циклов до разрушения $N_f$ изменяется в интервале от $10^2$ до $5 \cdot 10^4$).

9.7.2. Испытания проводят для определения коэффициентов снижения сопротивления циклическому разрушению материалов $\varphi_F$, их сварных соединений и металла наплавки $\varphi_{Fs}$ в результате нейтронного облучения.

9.7.3. Коэффициент снижения сопротивления малоцикловому разрушению $\varphi_F = (\varphi_{Fs})$ определяют при симметричном цикле заданных деформаций и температуре 20° С в зависимости от температуры облучения, переноса нейтронов ($E \geqslant 0{,}5$ МэВ) и амплитуды деформации.

9.7.4. Образцы для испытаний могут быть облучены предварительно или вырезаны из элемента конструкции, подвергавшегося в процессе эксплуатации действию нейтронного облучения.

9.7.5. Геометрия рабочей части образцов должна соответствовать ГОСТ 25.502—79.

Допускается использование образцов, приведенных на рис. П2.6—П2.8.

9.7.6. Формы и размеры головок образцов зависят от условий облучения (теплосъема и крепления в навеске или ампуле) и способа его крепления в захватах испытательной машины.

9.7.7. Все образцы должны быть промаркированы с обоих концов, причем маркировка должна сохраняться на всех стадиях облучения и последующего испытания.

9.7.8. Облучение образцов проводится в соответствии с требованиями п. 8.2 настоящего приложения.

9.7.9. Испытание облученных образцов на малоцикловую усталость проводят при нагружении заданными деформациями (осевое растяжение-сжатие, повторный изгиб или кручение) по симметричному циклу при температуре 20° С.

9.7.10. Экспериментальное оборудование, количество образцов и порядок проведения испытаний должны удовлетворять требованиям ГОСТ 25.502—79.

9.7.11. Испытание образцов в исходном состоянии проводят по той же методике и на том же экспериментальном оборудовании, что и испытание облученных образцов.

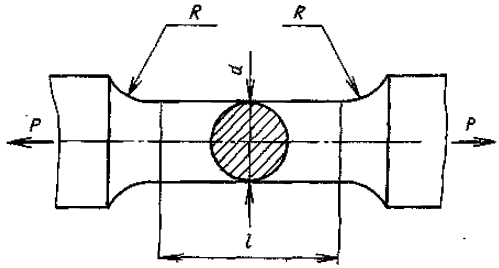



Рис. П2.6. Форма и размеры рабочей части образца для испытаний в условиях осевого растяжения-сжатия при $R \geqslant d$:

| $d$, мм | $l$, мм |
|---|---|
| 3 | 6 |
| 5 | 10 |
| 7,5 | 15 |
| 10 | 20 |

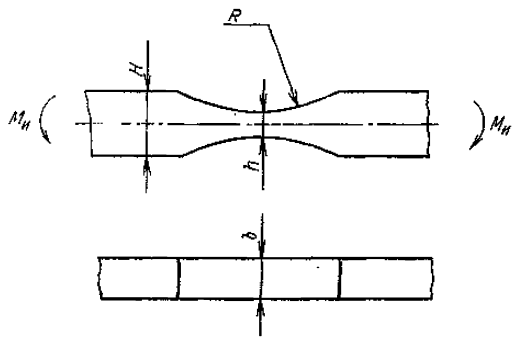



Рис. П2.7. Форма и размеры рабочей части образца для испытаний при повторном изгибе:

| $h$, мм | $b$, мм | $H/h$ | $R/h$ |
|---|---|---|---|
| 2—10 | (2—10) | 1,5—2 | $\geqslant 5$ |

9.7.12. Конструкция оборудования должна быть такова, чтобы закрепление образцов в захватах машины, операции по настройке ее на заданный режим нагружения и установка экстензометра (тензорезистора) на рабочей части образца могли осуществляться дистанционно при помощи манипулятора.

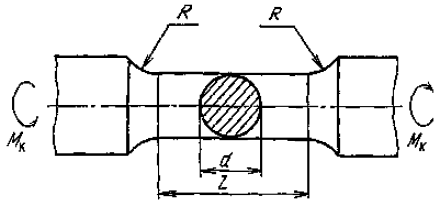



Рис. П2.8. Форма и размеры рабочей части образца для испытаний при повторном кручении:

| $d$, мм | $L$, мм | $R$, мм |
|---|---|---|
| 3—10 | $3d$ | $\geqslant d$ |

9.7.13. Экстензометры и динамометрический элемент машины должны проходить тарировку не реже 1 раза в год.

9.7.14. Данные испытаний облученных образцов на малоцикловую усталость обрабатывают в соответствии с п. 9.6.2.

9.7.15. Коэффициент $\varphi_F(\varphi_{Fs})$ для данных условий облучения определяют как отношение амплитуд разрушающих деформаций образцов облученного $e_{aF}$ и необлученного $e_a$ материалов при одинаковом числе циклов и представляют в виде $\varphi_F = f(e_a)\,[\varphi_{Fs} = f(e_a)]$. При определении значения $\varphi_{Fs}$ используются кривые усталости, являющиеся нижними огибающими кривых усталости для различных зон сварного соединения или наплавки, включая переходные зоны.

## 10. МЕТОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МЕТАЛЛОВ

### 10.1. МЕТОД ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ

10.1.1. Технологические испытания на изгиб при нормальной температуре, форма и размеры образцов должны соответствовать требованиям ГОСТ 14019—80.

10.1.2. Оценка результатов испытаний на изгиб проводится в соответствии с требованиями стандартов и технических условий на поставку.

### 10.2. ТРУБЫ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗГИБ

10.2.1. Методы испытания на изгиб образцов в виде отрезков труб, размеры образцов, место вырезки образцов для испытания и оценка результатов определяются в соответствии с требованиями стандартов технических условий на поставку.

### 10.3. ТРУБЫ. МЕТОД ИСПЫТАНИЙ НА СПЛЮЩИВАНИЕ

10.3.1. Метод испытания труб на сплющивание, размеры образца, место вырезки образцов для испытаний и оценка испытаний определяются в соответствии с требованием стандартов и технических условий на поставку.

## 11. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

11.1. Определение механических свойств сварного соединения на статическое растяжение, изгиб или сплющивание (для труб с толщиной стенки до $s=12$ мм — на ударный изгиб), а также испытания на статическое растяжение для металла шва, металла различных участков околошовной зоны и наплавленного металла при всех видах сварки, место вырезки, форма и размеры образцов, их количество, условия проведения испытаний, оценка результатов испытаний должны соответствовать требованиям ГОСТ 6996—66.

11.2. Испытания сварного соединения на статический изгиб проводятся для стыковых сварных соединений:

формы и размеры образца, место вырезки образцов, требования к изготовлению образцов, условия проведения испытаний при испытании на изгиб определяются ГОСТ 6996—66. При толщине металла более 50 мм размеры образца оговариваются специальными техническими условиями.

11.3. Испытания по сплющиванию проводятся на отрезках труб, размеры которых определены ГОСТ 6996—66; условия проведения испытаний, оценка результатов испытаний устанавливаются согласно ГОСТ 6996—66.

11.4. Испытания металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезанных образцах) проводятся в соответствии с ГОСТ 6996—66 на образцах типа IX или X, XI.

11.5. Испытания на статический изгиб металла с наплавкой.

11.5.1. Для испытания на изгиб наплавленного антикоррозионного покрытия используются контрольные наплавки, выполненные при аттестации новых материалов.

11.5.2. Контрольная наплавка разрезается на две части, одна из которых используется для изготовления изгибных образцов без термической обработки, а вторая перед вырезкой образцов подвергается высокому отпуску согласно производственно-технологической документации на изготовление соответствующих изделий с наплавлением антикоррозионным покрытием.

11.5.3. Образцы для изготовления на изгиб наплавленного антикоррозионного покрытия.

11.5.3.1. Из контрольной наплавки вырезают образцы

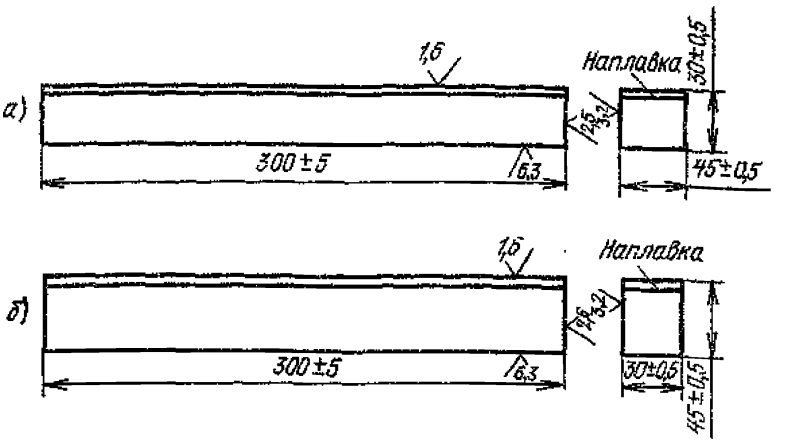



Рис. П2.9. Типы образцов:
*а* — типа А1 и А2; *б* — типа В1 и В2

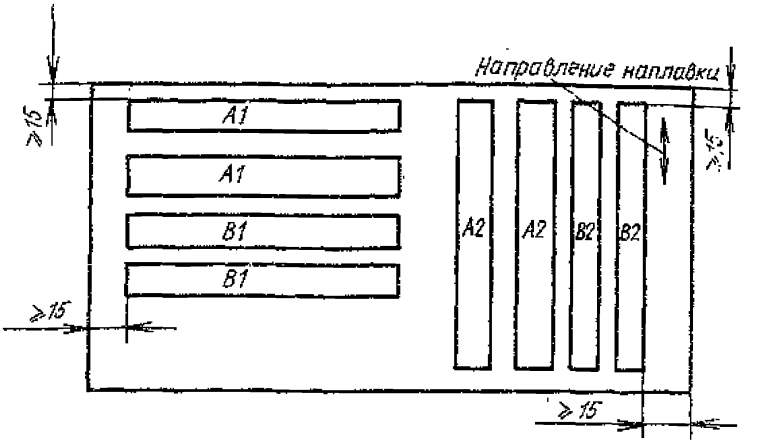



Рис. П2.10. Схема вырезки образцов:
*А1* — с наплавкой по широкой стороне с продольной осью поперек направления наплавки; *А2* — то же с продольной осью вдоль направления наплавки; *В1* — образец с наплавкой по узкой стороне с продольной осью поперек направления наплавки; *В2* — то же с продольной осью вдоль направления наплавки

четырех типов, форма и размеры которых должны соответствовать рис. П2.9 и П2.10.

11.5.3.2. Для отдельных типов образцов приняты обозначения, указанные на рис. П2.10.

11.5.3.3. При изготовлении образцов следует соблюдать следующие условия:

поверхность наплавленного покрытия обрабатывают механическим способом до выравнивания поверхности с обеспечением толщины покрытия в пределах установленных допусков;

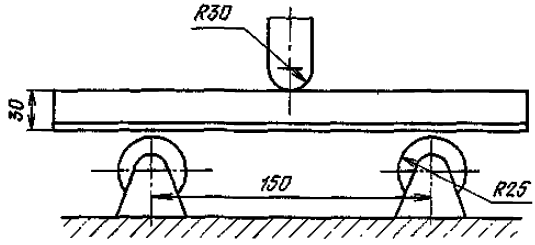



Рис. П2.11. Схема испытания образцов из наплавленного металла

направление механической обработки должно совпадать с продольной осью образца;

продольные кромки образцов должны быть скруглены радиусом 0,5 мм.

11.5.4. Испытательное оборудование.

Испытания на изгиб образцов наплавленного антикоррозионного покрытия проводятся на испытательных машинах или прессах соответствующей мощности. При этом радиус закругления пуансона и опор, а также расстояние между опорами должны соответствовать рис. П2.11, а ширина пуансона и опор должна превышать ширину образца.

11.5.5. Проведение испытаний.

11.5.5.1. Нагружение образцов осуществляют плавно со скоростью перемещения пуансона не более 0,25 мм · с$^{-1}$.

11.5.5.2. Испытания на изгиб образцов наплавленного антикоррозионного покрытия проводят сосредоточенной нагрузкой в середине пролета между опорами (рис. П2.11) до появления первой трещины или до заданного угла изгиба. Металл наплавки в зависимости от типа образцов должен быть расположен согласно рис. П2.12.

11.5.6. Оценка результатов испытаний.

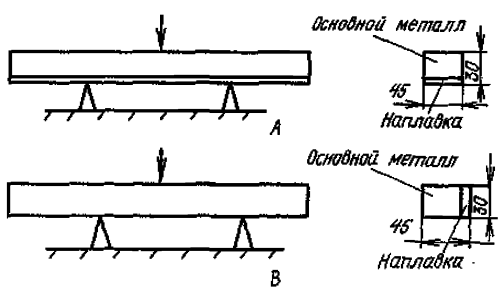



Рис. П2.12. Схема расположения образцов при испытании

11.5.6.1. При испытаниях на статический изгиб осматриваются наружная поверхность и кромки изогнутой части образцов без применения увеличительных средств.

11.5.6.2. Угол изгиба измеряют в ненапряженном состоянии образца и определяют с погрешностью не более 2°.

11.5.6.3. При проведении испытаний на изгиб до появления первой трещины определяют угол изгиба, полученный до появления первой трещины в напряженном состоянии.

11.5.6.4. Трещины, возникающие в процессе испытаний на растянутой стороне и на кромках образца, не считаются браковочным признаком, если их длина не превышает 20% ширины образца и составляет не более 5 мм, за исключением трещин, возникающих в зоне сплавления антикоррозионного покрытия с основным металлом.

При испытании определяют место образования трещины или разрушения:

1) по шву;
2) по зоне термического влияния;
3) по основному металлу.

11.5.6.5. Оценку результатов испытаний проводят в зависимости от требований соответствующей нормативно-технической документации.

11.5.7. Протокол испытаний.

В протоколе испытания следует указать:

1) марку и партию основного металла;
2) марку и партии сварочных наплавочных материалов;
3) способ сварки наплавки;
4) вид и режим термической обработки;
5) метод испытания;
6) тип и размеры образца;
7) маркировку образца;
8) диаметр оправки пуансона;
9) радиус опор;
10) результаты испытания.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 3*
(рекомендуемое)

## УНИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ, ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УСИЛИЙ

### Условные обозначения

$s$ — толщина, мм
$R_s$ — средний радиус оболочки, мм
$R$ — текущий радиус толстостенного цилиндра, пластины, кольца, мм

$R_0$ — радиус внутренней крайней точки кольца, внутренний радиус патрубка, мм

$R_c$ — радиус центра тяжести сечения кольца, радиус наружной поверхности двухслойного толстостенного цилиндра, мм

$R_a$ — внутренний радиус толстостенного цилиндра, мм

$R_b$ — наружный радиус толстостенного цилиндра, радиус общей поверхности двухслойного толстостенного цилиндра, мм

$R_т$ — радиус галтели в месте стыка патрубка с корпусом, мм

$R_н$ — наружный радиус пластины, радиус наружной крайней точки кольца, мм

$Q_i$, $P_i$ — внешние распределенные по кольцу усилия в радиальном и вертикальном направлении соответственно, Н/мм (кгс/мм)

$M$ — изгибающий момент, Н · мм (кгс · мм)

$M_i$ — внешний распределенный по кольцу момент, Н · мм/мм (кгс · мм/мм)

$N_c$ — равномерно распределенное усилие, отнесенное к центру тяжести сечения кольца, Н/мм (кгс/мм)

$M_c$ — равнодействующий момент, отнесенный к центру тяжести сечения кольца, Н · мм (кгс · мм)

$M_0$ — сосредоточенный изгибающий момент, Н · мм (кгс · мм)

$M_1$ — изгибающий момент, приложенный к патрубку в меридиональной плоскости корпуса, Н · м (кгс · мм)

$M_2$ — изгибающий момент, приложенный к патрубку в плоскости поперечного сечения корпуса, Н · мм (кгс · мм)

$M_z$, $M_r$, $M_\varphi$, $M_\theta$ — осевой, радиальный, меридиональный и кольцевой изгибающие моменты соответственно, Н · мм/мм (кгс · мм/мм)

$\sigma_z$, $\sigma_r$, $\sigma_\varphi$, $\sigma_\theta$ — осевое, радиальное, меридиональное и кольцевое напряжения соответственно, Па (кгс/мм$^2$)

$N_z$, $N_\varphi$, $N_\theta$ — осевое, меридиональное и кольцевое усилия соответственно, Н/мм (кгс/мм)

$H$ — перерезывающее в оболочке усилие, действующее в плоскости параллельного круга, радиальное усилие в пластине, Н/мм (кгс/мм)

$\vartheta$ — угол поворота, рад

$w$ — радиальное перемещение оболочки, прогиб пластины, мм

$u$ — радиальное перемещение пластины и кольца, мм

$\alpha_\sigma$ — коэффициент концентрации

$m$ — показатель ползучести

$z$ — расстояние от края вдоль оси цилиндрической оболочки, для пластин и колец расстояние по оси ординат, мм

$l$ — длина короткой цилиндрической оболочки, мм

$d_i$, $d$ — диаметр отверстий, мм

$t$ — шаг отверстий, мм

$n_i$ — число отверстий диаметром $d_i$

$h$ — высота кольца, мм

$F$ — эффективная площадь поперечного сечения кольца, мм$^2$

$J_x$ — момент инерции поперечного сечения кольца относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения кольца и перпендикулярной оси кольца, мм$^4$

$f_1$ — отношение толщин стыкуемых элементов

$\varphi$ — угол, рад

$\varphi_н$ — коэффициент ослабления при расчете напряжений

$\varphi_и$ — коэффициент ослабления при изгибе

$\varphi_c$ — коэффициент ослабления при растяжении-сжатии

$E$ — модуль продольной упругости, Па (кгс/мм$^2$)

$\mu$ — коэффициент Пуассона

$\alpha$ — температурный коэффициент линейного расширения, 1/К (1/°С)

$D=\frac{Es^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость, Н · мм (кгс · мм)

$к=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}$ — коэффициент, зависящий от свойств материала

$f$ — безразмерная функция, характеризующая закон изменения краевого момента по образующей патрубка

$T$ — температура, К (°С)

$p$ — давление на единицу поверхности, Па (кгс/мм$^2$)

$p_a$ — внутреннее давление на единицу поверхности, Па (кгс/мм$^2$)

$p_b$ — наружное давление на единицу поверхности, Па (кгс/мм$^2$)

$P$ — сосредоточенная сила, Н (кгс)

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее приложение к Нормам содержит рекомендуемые унифицированные методы расчетного и экспериментального определения напряжений, деформаций, перемещений и усилий.

1.2. Наряду с изложенными методами и формулами допускается использование для расчета других расчетных методик и формул, позволяющих получить результаты с большей точностью.

## 2. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ, ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УСИЛИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК, ПЛАСТИН И КОЛЕЦ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

### 2.1. ПРАВИЛО ЗНАКОВ

2.1.1. Положительные направления усилий и перемещений (при принятом направлении отсчета текущей координаты вдоль

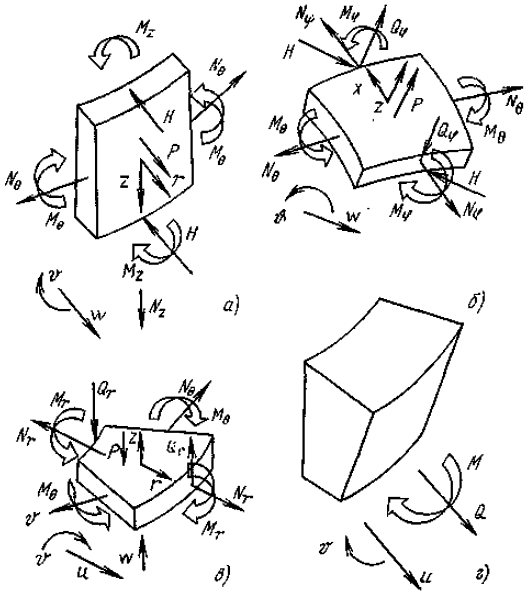


Рис. П3.1. Положительные направления усилий и перемещений:
*а*—цилиндрическая оболочка; *б*—сферическая оболочка; *в*—пластина; *г*—кольцо

меридиана) для цилиндрической и сферической оболочек, пластины и кольца показаны на рис. П3.1.

Знаки «±» в формулах для напряжений в оболочках относятся к наружной «+» и внутренней «−» поверхностям оболочек.

Знаки «±» в формулах для напряжений в пластинах относятся к верхней «+» и нижней «−» поверхностям пластины.

### 2.2. ЭЛЕМЕНТЫ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК И КРАЕВЫХ УСИЛИЙ

2.2.1. Цилиндрическая тонкостенная оболочка постоянной толщины

В табл. П3.1 приведены формулы для вычисления перемещений, усилий и напряжений в цилиндрической оболочке от равномерного внутреннего давления и осевой силы, а также от гидростатического давления.

В табл. П3.2 даны формулы для расчета перемещений, усилий и напряжений в полубесконечной оболочке от неравно-

мерного вдоль меридиана и по толщине осесимметричного температурного поля.

В табл. П3.3 и П3.4 указаны формулы для нахождения перемещений, усилий и напряжений соответственно в полубесконечной (табл. П3.3) и короткой (табл. П3.4) оболочках от краевых перерезывающих сил и изгибающих моментов (осевая сила отсутствует) и заданных краевых смещений в коротких оболочках.

Эти формулы применимы, если радиальные перемещения малы по сравнению с толщиной оболочки. При отношении $s/R_s \leqslant 0{,}05$ погрешность формул менее 5%; при $s/R_s \leqslant 0{,}1$ — менее 10%. Оболочки могут рассматриваться как полубесконечные, если их длина $l \geqslant 2{,}5\sqrt{R_s s}$. В противном случае следует применять формулы для короткой оболочки.

2.2.2. Сферическая тонкостенная оболочка постоянной толщины без отверстия и с отверстием в вершине (сферический сегмент).

В табл. П3.5 даны формулы для вычисления перемещений, усилий и напряжений в сферической оболочке без отверстия и с отверстием в вершине от равномерного внутреннего давления и меридионального растягивающего усилия.

В табл. П3.6 приведены формулы для нахождения перемещений, усилий и напряжений в сферической оболочке без отверстия в вершине от неравномерного вдоль меридиана и по толщине осесимметричного температурного поля.

В табл. П3.7 даны формулы для расчета перемещений, усилий и напряжений в сферической оболочке без отверстия в вершине от краевых перерезывающих усилий и изгибающих моментов.

Все формулы применимы при малых по сравнению с толщиной радиальных перемещениях и при следующих условиях для углов:

$$\varphi_0,\ \varphi_1 \text{ — любые (табл. П3.5);}$$

$$\varphi_0 \text{ — любой (табл. П3.6);}$$

$$\varphi^* \leqslant \varphi_0 \leqslant \pi - \varphi^* \text{ (табл. П3.6, П3.7)}$$

(при $\varphi_0 < \varphi^* = 2{,}5\sqrt{s/R_s}$ следует применять формулы для сферической оболочки).

При соблюдении указанных условий и отношении $s/R_s \leqslant 0{,}05$ погрешность формул составляет менее 5%, при $s/R_s \leqslant 0{,}1$ — менее 10%.

2.2.3. Эллиптическая тонкостенная оболочка постоянной толщины (полуэллипсоид).

В табл. П3.8 приведены формулы для расчета перемещений, усилий и напряжений в эллиптической оболочке от равномерного внутреннего давления $p$ и меридионального растягивающего усилия $N_\varphi = pa/2$.

Таблица П3.1. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в цилиндрической тонкостенной оболочке. Нагрузка — внутреннее давление**

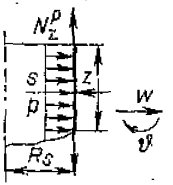
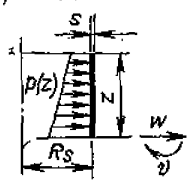
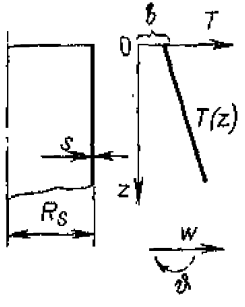
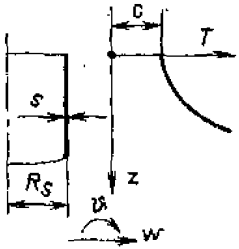
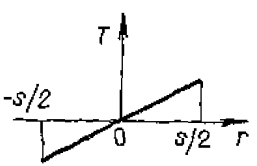
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| Равномерное внутреннее давление $p$ и осевая сила<br>$N_z^p = pR_s/2$<br><br> | Произвольное, $z = z$ | $w^p = \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)\frac{R_s^2}{Es}p;$<br>$\vartheta^p = 0;$ $\quad N_z^p = p\frac{R_s}{2};$<br>$M_z^p = 0;$ $\quad N_\theta^p = pR_s;$<br>$H_z^p = 0;$ $\quad M_\theta^p = 0;$<br>$\sigma_z^p = \frac{pR_s}{2s};\ \sigma_\theta^p = \frac{pR_s}{s}$ | $a$, $b$ — параметры |
| Гидростатическое давление, линейно меняющееся вдоль меридиана,<br>$p(z) = az + b$<br><br> | Произвольное, $z = z$ | $w^p = \frac{R_s^2}{Es}(az + b);$<br>$\vartheta^p = \frac{-R_s^2}{Es}a;$ $\quad N_z^p = 0;$<br>$M_z^p = 0;$ $\quad N_\theta^p = R_s(az + b);$<br>$H_z^p = 0;$ $\quad M_\theta^p = 0;$<br>$\sigma_z^p = 0;\ \sigma_\theta^p = \frac{R_s}{s}(az + b)$ | — |

Таблица П3.2. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в полубесконечной цилиндрической оболочке. Нагрузка — осесимметричное температурное поле**

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| Температура постоянна по толщине и по длине оболочки, $T=T^*$ | Произвольное, $z=z$ | $w^T=dR_s T^*$; $\vartheta^T=0$; $M_z^T=0$; $H_z^T=0$; $N_z^T=0$; $N_\theta^T=0$; $M_\theta^T=0$; $\sigma_z^T=\sigma_\theta^T=0$ | — |
| Температура постоянна по толщине и линейно меняется по длине, $T(z)=az+b$   | Край, $z=0$ | $w_0^T=\alpha R_s b$; $\vartheta_0^T=-\alpha R_s a$; $M_{z_0}^T=0$; $H_{z_0}^T=0$; $N_{z_0}^T=0$; $N_{\theta_0}^T=0$; $M_{\theta_0}^T=0$; $\sigma_{z_0}^T=\sigma_{\theta_0}^T=0$ | — |
| | Произвольное, $z=z$ | $w^T=\alpha R_s(az+b)$; $\vartheta^T=-\alpha R_s a$; $M_z^T=0$; $H_z^T=0$; $N_z^T=0$; $N_\theta^T=0$; $M_0^T=0$; $\sigma_z^T=\sigma_\theta^T=0$ | — |
| Температура постоянна по толщине и меняется по длине по квадратичной параболе, $T(z)=az^2+bz+c$ | Край, $z=0$ | $w_0^T=\frac{1}{2\beta^2 D}M^*+\alpha R_s c$; $\vartheta_0^T=\frac{1}{\beta D}M^*-\alpha R_s b$; $M_{z_0}^T=0$; $N_{\varphi_0}^T=0$; $N_{\theta_0}^T=-\frac{E\alpha a s}{\beta^2}$; | $M^*=-2D\alpha R_s a$; $\beta=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_s s}}$; |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | $H^T_{z_0}=0;$ $M^T_{\theta_0}=0;$<br>$\sigma_{z_0}=0;\ \sigma_{\theta_0}=-\dfrac{E\alpha a}{\beta^2}$ | $f_1=e^{-\xi}\cos\xi;$<br>$f_2=e^{-\xi}\sin\xi;$<br>$f_3=f_1-f_2;$<br>$f_4=f_1+f_2;$ |
|  | Произвольное, $z=z$ | $w^T=\dfrac{1}{2\beta^2 D}f_3M^*+\alpha R_s(az^2+bz+c);$<br>$\vartheta^T_0=\dfrac{1}{\beta D}f_1M^*-\alpha R_s(2az+b);$ $N^T_z=0;$<br>$M^T_z=(1-f_4)M^*;$ $N^T_\theta=\dfrac{E\alpha ah}{\beta^2}f_3;$<br>$H^T_z=-2\beta f_2M^*;$ $M^T_\theta=\mu M^T_z;$<br>$\sigma^T_z=\pm\dfrac{6(1-f_4)M^*}{s^2};\ \sigma^T_\theta=\mu\sigma^T_z-\dfrac{E\alpha a}{\beta^2}f_3$ | $\xi=\beta z$ |
| | Вдали от края, $z>2{,}5\sqrt{R_s s}$ | $w^T=\alpha R_s(az^2+bz+c);$<br>$\vartheta^T=-\alpha R_s(2az+b);$ $N^T_z=0;$<br>$M^T_z=M^*;$ $N^T_\theta=0;$<br>$H^T_z=0;$ $M^T_\theta=\mu M^T_z;$<br>$\sigma^T_z=\pm\dfrac{6M^*}{s^2};\ \sigma^T_\theta=\mu\sigma^T_z$ | |
| Температура линейно меняется по толщине; средняя по толщине температура равна нулю<br> | Край, $z=0$ | $w^T_0=\dfrac{1}{2\beta^2 D}\left(M^*_0+\dfrac{1}{\beta}H^*\right);$<br>$\vartheta^T_0=\dfrac{1}{2\beta^2 D}(2\beta M^*_0+H^*);$ $N^T_{\varphi_0}=0;$<br>$M^T_{z_0}=0;$ $N^T_{\theta_0}=\dfrac{Ew^T_0}{R_{cp}}s;$ | |

*Продолжение табл. П3.2*

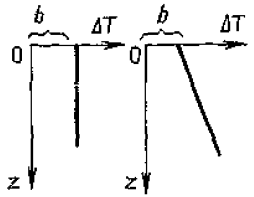
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| | | $H^T_{z_0}=0;$ $\quad M^T_{\theta_0}=(1-\mu)M^*_0;$<br>$\sigma^T_{z_0}=0;\ \sigma^T_{\theta_0}=-\frac{E\alpha}{2}\left[\sqrt{\frac{1+\mu}{3(1-\mu)}}\left(b+\frac{a}{\beta}\right)\pm b\right]$ | |
| Разность температур наружной и внутренней поверхностей $\Delta T$ либо не меняется по длине $(\Delta T=b)$, либо меняется по длине линейно $(\Delta T=az+b)$<br> | Произвольное, $z=z$ | $w^T=\frac{1}{2\beta^2 D}\left(f_3M^*_0+\frac{1}{\beta}f_1H^*\right);$<br>$\vartheta^T=\frac{1}{2\beta^2 D}(2\beta f_1M^*_0+f_4H^*);\quad N^T_z=0;$<br>$M^T_z=-\left(f_4M^*_0+\frac{1}{\beta}f_2H^*\right)+M^*;\quad N^T_\theta=\frac{Ew^T}{R_{cp}}s;$<br>$H^T_z=-(2\beta f_2M^*_0+f_3H^*)+H^*;\ M^T_\theta=\mu M^T_z+(1-\mu)M^*;$<br>$\sigma^T_z=\pm\frac{6M^T_z}{s^2};\ \sigma^T_\theta=\frac{N^T_\theta}{s}\pm\frac{6M^T_\theta}{s^2}$ | $M^*=\frac{-D(1+\mu)}{s}\alpha(az+b);$<br>$M^*_0=\frac{-D(1+\mu)}{s}\alpha b;$<br>$H^*=\frac{-D(1+\mu)}{s}\alpha a$ |
| | Вдали от края, $z>2{,}5\sqrt{R_cs}$ | $w^T=0;$ $\quad N^T_z=0;$<br>$\vartheta^T=0;$ $\quad N^T_\theta=0;$<br>$M^T_z=M^*;$ $\quad M^T_\theta=M^*;$<br>$H^T_z=H^*;$<br>$\sigma^T_z=\sigma^T_\theta=\pm\left[\frac{-\alpha E\Delta T}{2(1-\mu)}\right]$ | — |

Таблица П3.3. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной цилиндрической полубесконечной оболочке постоянной толщины. Нагрузка — осесимметричные краевые усилия**

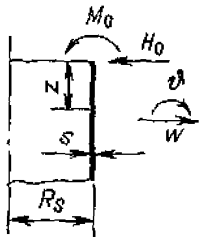
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| Усилия $M_0$ и $H_0$ на краю, $z=0$   | Край, $z=0$ | $w_0=-\frac{1}{2\beta^2 D}\left(M_0+\frac{1}{\beta}H_0\right)$; $\vartheta_0=-\frac{1}{2\beta^2 D}(2\beta M_0+H_0)$; $N_{z_0}=0$ $M_{z_0}=M_0$; $N_{\theta_0}=\frac{Es}{R_s}w_0$; $H_{z_0}=H_0$; $M_{\theta_0}=\mu M_0$; $\sigma_{z_0}=\pm\frac{6M_0}{s^2}$; $\sigma_{\theta_0}=\frac{N_{\theta_0}}{s}\pm\frac{6M_{\theta_0}}{s^2}$ | $\beta=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_s s}}$; $f_1=e^{-\xi}\cos\xi$; $f_2=e^{-\xi}\sin\xi$; $f_3=f_1-f_2$; |
| | Произвольное, $z=z$ | $w=-\frac{1}{2\beta^2 D}\left(f_3 M_0+\frac{1}{\beta}f_1 H_0\right)$; $\vartheta=-\frac{1}{2\beta^2 D}(2\beta f_1 M_0+f_4 H_0)$; $N_z=0$ $M_z=f_4 M_0+\frac{1}{\beta}f_2 H_0$; $N_\theta=\frac{Es}{R_s}w$; $H_z=2\beta f_2 M_0+f_3 H_0$; $M_\theta=\mu M_z$; $\sigma_z=\pm\frac{6M_z}{s^2}$; $\sigma_\theta=\frac{N_\theta}{s}\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $f_4=f_1+f_2$; $\xi=\beta z$ |

Таблица П3.4. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной цилиндрической короткой оболочке постоянной толщины. Нагрузка — осесимметричные краевые смещения и усилия**

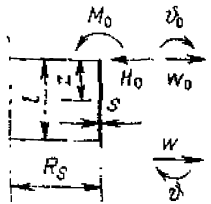
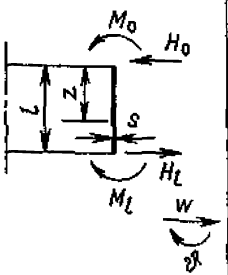
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| На краю, $z=0$, известны усилия $M_0$, $H_0$ и смещения $w_0$, $\vartheta_0$<br> | Произвольное, $z=z$ | $w=-\left(-y_1 w_0+\frac{1}{\beta}y_2\vartheta_0+\frac{1}{\beta^2 D}y_3 M_0+\frac{1}{\beta^3 D}y_4 H_0\right)$;<br>$\vartheta=\beta\left(4y_4 w_0+\frac{1}{\beta}y_1\vartheta_0+\frac{1}{\beta^2 D}y_2 M_0+\frac{1}{\beta^3 D}y_3 H_0\right)$; $N_z=0$;<br>$M_z=\beta D\left(4y_3 w_0-\frac{4}{\beta}y_4\vartheta_0+\frac{1}{\beta^2 D}y_1 M_0+\frac{1}{\beta^3 D}y_2 H_0\right)$; $N_\theta=\frac{Es}{R_s}w$;<br>$H_z=\beta^3 D\left(4y_2 w_0-\frac{4}{\beta}y_3\vartheta_0-\frac{4}{\beta^2 D}y_4 M_0+\frac{1}{\beta^3 D}y_1 H_0\right)$; $M_\theta=\mu M_z$;<br>$\sigma_z=\pm\frac{6M_z}{s^2}$; $\sigma_\theta=\frac{N_\theta}{s}\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $y_1=\cos\xi\operatorname{ch}\xi$;<br>$y_2=\frac{1}{2}(\operatorname{ch}\xi\sin\xi+\operatorname{sh}\xi\cos\xi)$;<br>$y_3=\frac{1}{2}\sin\xi\operatorname{sh}\xi$;<br>$y_4=\frac{1}{4}(\operatorname{ch}\xi\sin\xi-\operatorname{sh}\xi\cos\xi)$;<br>$\xi=\beta z$; $\beta=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_s s}}$ |
| На краях, $z=0$ и $z=l$, заданы усилия $M_0$, $H_0$, $M_l$, $H_l$<br> | Края, $z=0$, $z=l$ | $w_0=\frac{1}{4\beta^2 D b_0}(\beta b_1 M_0-b_2 H_0+\beta y_3 M_l-y_4 H_l)$;<br>$\vartheta_0=\frac{1}{4\beta^2 D b_0}(-\beta b_3 M_0+b_1 H_0+\beta y_2 M_l-y_3 H_l)$;<br>$w_l=\frac{1}{4\beta^3 D b_0}(\beta y_3 M_0+y_4 H_0+\beta b_1 M_l+b_2 H_l)$;<br>$\vartheta_l=\frac{1}{4\beta^2 D b_0}(-\beta y_2 M_0-y_3 H_0+\beta b_3 M_l+b_1 H_l)$; | $b_0=y_3^2-y_2 y_4$;<br>$b_1=y_1 y_3-y_2^2$;<br>$b_2=y_2 y_3-y_1 y_4$;<br>$b_3=y_1 y_2+4y_3 y_4$.<br>Вычисляются при $\xi=\beta l$ |
| | Произвольное, $z=z$ | $w$, $\vartheta$, $M_z$, $H_z$ вычисляют по формулам данной таблицы, в которые подставляют заданные усилия $M_0$, $H_0$, а также перемещения $w_0$, $\vartheta_0$, вычисленные по формулам этой же таблицы | |

Таблица П3.5. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной сферической оболочке постоянной толщины без отверстия и с отверстием в вершине. Нагрузка — внутреннее давление**

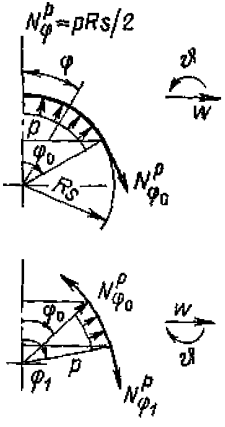
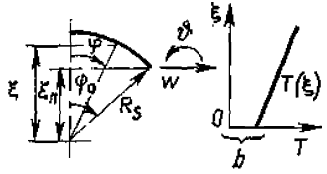
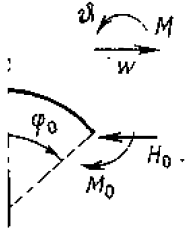
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| Равномерное внутреннее давление и меридиональное растягивающее усилие   | Произвольное, $\varphi = \varphi$ | $w^p = (1-\mu)\dfrac{pR_s^2}{2Es}\sin\varphi$; $\vartheta^p = 0$; $N_\varphi^p = \dfrac{pR_s}{2}$; $N_\theta^p = \dfrac{pR_s}{2}$; $M_\varphi^p = 0$; $M_\theta^p = 0$; $H_\varphi^p = 0$; $\sigma_\varphi^p = \sigma_\theta^p = \dfrac{pR_s}{2s}$ | — |

Таблица П3.6. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной сферической оболочке постоянной толщины без отверстия в вершине. Нагрузка — осесимметричное температурное поле**

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| Температура постоянна по толщине и вдоль меридиана, $T=T^*$ | Произвольное, $\varphi=\varphi$ | $w^T=\alpha R_s T^* \sin\varphi$; $\vartheta^T=0$; $M_\varphi^T=0$; $H_\varphi^T=0$; $\sigma_\varphi^T=\sigma_\theta^T=0$; $N_\varphi^T=0$; $N_\theta^T=0$; $M_\theta^T=0$; | — |
| Температура постоянна по толщине и линейно меняется вдоль оси вращения, $T(\xi)=a\xi+b$; $\xi=R_s\cos\varphi$   | Произвольное, $\varphi=\varphi$ | $w^T=\alpha R_s \sin\varphi\,(aR_s\cos\varphi+b)$; $\vartheta^T=-\alpha R_s \sin^3\varphi$; $M_\varphi^T=0$; $H_\varphi^T=0$; $\sigma_\varphi^T=\sigma_\theta^T=0$; $N_\varphi^T=0$; $N_0^T=0$; $M_\theta^T=0$; | — |
| Температура линейно меняется по толщине; средняя по толщине температура равна нулю, разность температур наружной и внутренней поверхностей не меняется вдоль меридиана, $\Delta T=a$ | Край, $\varphi=\varphi_0$ | $w_0^T=\frac{2\beta^2\sin\varphi_0}{Es\kappa_{10}}M^*$; $\vartheta_0^T=\frac{4\beta^3}{ER_\varphi s}\frac{1}{\kappa_{10}}M^*$; $M_{\varphi_0}^T=0$; $H_{\varphi_0}^T=0$; $\sigma_{\varphi_0}^T=0$; $\sigma_{\theta_0}^T=\frac{N_{\theta_0}^T}{s}\pm\frac{6M_{\theta_0}^T}{s^2}$; $N_{\varphi_0}^T=0$; $N_{\theta_0}^T=\frac{Ew_0^T}{R_s}s$; $M_{\theta_0}^T=(1-\mu)M^*$; | $M^*=\frac{-D(1+\mu)}{s}\alpha a$; $\beta=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\times$ $\times\sqrt{R_s/s}$; $\kappa_1=1-\frac{1-2\mu}{2\beta}\operatorname{ctg}\varphi$; $\kappa_2=1-\frac{1+2\mu}{2\beta}\operatorname{ctg}\varphi$; |

| | | |
|---|---|---|
| Произвольное, $\varphi = \varphi$ | $w^T = \frac{2\beta^2}{Es} D_0 \sin\varphi \left(f_1 - \kappa_2 f_2\right) M^*$;<br>$\vartheta^T = \frac{4\beta^3}{ER_\varphi s} D_0 f_1 M^*$; $\quad N_\varphi^T = 0$;<br>$M_\varphi^T = -D_0 \left(f_2 + \kappa_1 f_1\right) M^* + M^*$; $\quad N_\theta^T = \frac{Ew^T}{R_s} s$;<br>$H_\varphi^T = -\frac{2\beta}{R_s \sin\varphi} D_0 f_2 M^*$; $\quad M_\theta^T = \mu M_\varphi^T + (1-\mu) M^*$;<br>$\sigma_{\varphi_0}^T = \pm \frac{6M_\varphi^T}{s^2}$; $\sigma_\theta^T = \frac{N_\theta^T}{s} \pm \frac{6M_\theta^T}{s^2}$ | $\kappa_{10} = 1 - \frac{1-2\mu}{2\beta} \times$<br>$\times \operatorname{ctg}\varphi_0$;<br>$D_0 = \frac{1}{\kappa_{10}} \times$<br>$\times \sqrt{\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi}}$;<br>$f_1 = e^{-\xi}\cos\xi$;<br>$f_2 = e^{-\xi}\sin\xi$;<br>$\xi = \beta(\varphi_0 - \varphi)$ |
| Вдали от края, $\varphi_0 - \varphi > 2{,}5\sqrt{\frac{s}{R_s}}$ | $w^T = 0$;<br>$\vartheta^T = 0$; $\quad N_\varphi^T = 0$;<br>$M_\varphi^T = M^*$; $\quad N_\theta^T = 0$;<br>$H_\varphi^T = 0$; $\quad M_\theta^T = M^*$;<br>$\sigma_\varphi^T - \sigma_\theta^T = \left[\frac{-\alpha E \Delta T}{2(1-\mu)}\right]$ | |

Таблица П3.7. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной сферической оболочке постоянной толщины без отверстия в вершине. Нагрузка — осесимметричные краевые усилия**

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| На краю, $\varphi=\varphi_0$, заданы усилия $M_0$, $H_0$   | Край, $\varphi=\varphi_0$ | $w_0=\frac{-2\beta^2\sin\varphi_0}{Es\kappa_{10}}\left[M_0+\frac{R_s\sin\varphi_0}{\beta}\frac{2}{2}(1+\kappa_{10}\kappa_{20})H_0\right];$ $\vartheta_0=-\frac{2\beta^2\sin\varphi_0}{Es\kappa_{10}}\left(\frac{2\beta}{R_s\sin\varphi_0}M_0+H_0\right);$ $M_{\varphi_0}=M_0;$ $H_{\varphi_0}=H_0$ | $N_\varphi=$ $=-\cos\varphi H_\varphi;$ $N_\theta=$ $=-\mu\cos\varphi\times$ $\times H_\varphi+$ $+\frac{s}{R_s\sin\varphi}\times$ $\times Ew;$ | $\beta=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{R_s/s};$ $\kappa_1=1-\frac{1-2\mu}{2\beta}\operatorname{ctg}\varphi;$ $\kappa_2=1-\frac{1+2\mu}{2\beta}\operatorname{ctg}\varphi;$ $\kappa_{10}=1-\frac{1-2\mu}{2\beta}\operatorname{ctg}\varphi_0;$ $\kappa_{20}=1-\frac{1+2\mu}{2\beta}\operatorname{ctg}\varphi_0;$ $G_0=\sin\varphi_0\sqrt{1+\kappa_{10}^2};$ $D_0=\frac{1}{\kappa_{10}}\sqrt{\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi}};$ |
| | Произвольное, $\varphi=\varphi$ | $w=-\frac{2\beta^2}{Es}D_0\sin\varphi\left[(f_1-\kappa_2 f_2)M_0+\frac{R_s}{\beta}\frac{G_0}{2}\times\right.$ $\left.\times(f_3-\kappa_2 f_4)H_0\right];$ $\vartheta=-\frac{2\beta^2}{Es}D_0\left(\frac{2\beta}{R_{cp}}f_1M_0+G_0f_3H_0\right);$ | $M_\theta=\mu M_\varphi-$ | $f_1=e^{-\xi}\cos\xi;$ |

*Продолжение табл. П3.7*

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| | | $M_\varphi = D_0\left[\left(f_2+\kappa_1 f_1\right)M_0+\frac{R_s}{\beta}\frac{G_0}{2}\left(f_4+\kappa_1 f_3\right)H_0\right];$<br>$H_\varphi = D_0\left(\frac{2\beta}{r\sin\varphi}f_2 M_0+\frac{G_0}{\sin\varphi}f_4 H_0\right)$ | $-\frac{s^3\operatorname{ctg}\varphi}{12R_s}E\vartheta;$<br>$\sigma_\varphi=\frac{N_\varphi}{s}\pm$<br>$\pm\frac{6M_\varphi}{s^2};$ | $f_2=e^{-\xi}\sin\xi;$<br>$f_3=e^{-\xi}\cos(\xi+\gamma);$<br>$f_4=e^{-\xi}\sin(\xi+\gamma);$ |
| То же для полусферы, $\varphi_0=\frac{\pi}{2}$ | Край, $\varphi=\frac{\pi}{2}$ | $w_0=\frac{2\beta^2}{Es}\left(M_0+\frac{R_s}{\beta}-H_0\right);$<br>$\vartheta_0=\frac{2\beta^2}{Es}\left(\frac{2\beta}{R_s}M_0+H_0\right);$<br>$M_{\varphi_0}=M_0;$<br>$H_{\varphi_0}=H_0$ | $\sigma_\theta=\frac{N_\theta}{s}\pm$<br>$\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $\gamma=\operatorname{arctg}(-\kappa_{10});$<br>$\xi=\beta(\varphi_0-\varphi)$ |

Таблица П3.8. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной эллиптической оболочке постоянной толщины. Нагрузка — внутреннее давление и растягивающее усилие**

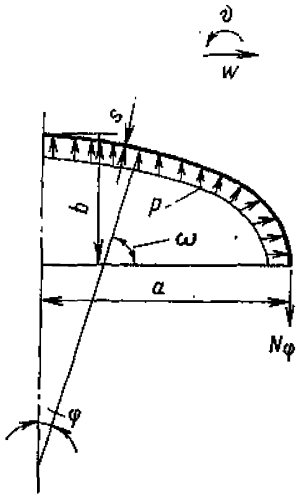
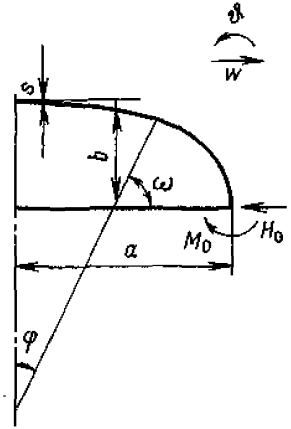
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| Равномерное внутреннее давление и меридиональное растягивающее усилие<br>$N_\varphi=\frac{pa}{2}$<br> | Край, $\varphi=\frac{\pi}{2}$ | $w=\frac{pa^2}{2sE}\left(2-\mu-\frac{a^2}{b^2}\right)$;<br>$\vartheta=0$;<br>$N_\varphi=\frac{pa}{2}$;<br>$N_\theta=\frac{pa}{2}\left(2-\frac{a^2}{b^2}\right)$;<br>$M_\varphi=M_\theta=H_\varphi=0$;<br>$\sigma_\varphi=\frac{pa}{2s}$;<br>$\sigma_\theta=\frac{pa}{2s}\left(2-\frac{a^2}{b^2}\right)$ | Радиусы кривизны оболочки, $R_1=\frac{b^2}{a}$;<br>$R_2=a$ |
| | Произвольное | $N_\varphi=\frac{pR_2}{2}$;<br>$N_\theta=\frac{pR_2}{2}\left(2-\frac{R_2}{R_1}\right)$;<br>$M_\varphi=M_\theta=H_\varphi=0$<br>$\sigma_\varphi=\frac{N_\varphi}{s}$;<br>$\sigma_\theta=\frac{N_\theta}{s}$; | $R_1=\frac{a^2}{b}\eta^3$;<br>$R_2=\frac{a^2}{b}\eta$;<br>$\eta=\left[1+\left(\frac{a^2}{b^2}-1\right)\times\cos^2\omega\right]^{-\frac{1}{2}}$;<br>$\omega=\frac{\pi}{2}-\varphi$ |
| | Полюс, $\varphi=0$ | $N_\varphi=N_\theta=\frac{pa^2}{2b}$;<br>$M_\varphi=M_\theta=H_\varphi=0$<br>$\sigma_\varphi=\sigma_\theta=\frac{pa^2}{2bs}$; | $R_1=R_2=\frac{a^2}{b}$ |

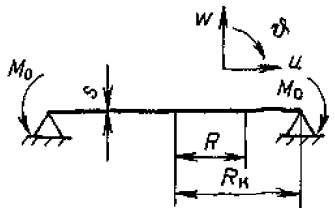
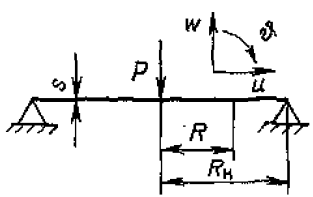
Таблица П3.9. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в осесимметричной эллиптической оболочке постоянной толщины. Нагрузка — осесимметричные краевые усилия**

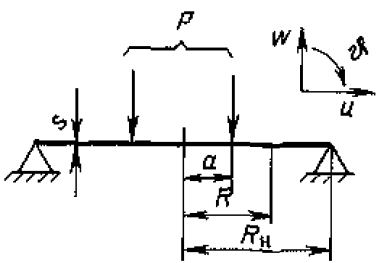
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| На краю, $\varphi=\frac{\pi}{2}$, заданы усилия $M_0$ и $H_0$   | Край, $\varphi=\frac{\pi}{2}$ | $w=-\frac{2\beta a^2}{sE}(H_0+\beta M_0)$; $\vartheta=-\frac{2\beta^2 a^2}{sE}(H_0+2\beta M_0)$; $N_\varphi=0$; $N_\theta=-2\beta a(H_0+\beta M_0)$; $M_\varphi=M_0$; $M_\theta=\mu M_0$; $\sigma_\varphi=\pm\frac{6M_0}{s^2}$; $\sigma_\theta=-\frac{2\beta a}{s}(H_0+\beta M_0)\pm\mu\frac{6M_0}{s^2}$ | $\beta=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{as}}$ |
| | Произвольное | $w=-\frac{2\beta\sin\varphi\, a\sqrt{aR_2}}{sE}(f_1H_0+\beta f_3M_0)$; $\vartheta=\frac{2a^2\beta^2}{sE}(f_4H_0+2\beta f_1M_0)$; $N_\varphi=-\frac{a}{R_2}(f_3H_0+2\beta f_2M_0)\operatorname{ctg}\varphi$; $M_\varphi=\sqrt{\frac{a}{R_2}}\left(\frac{f_2}{\beta}H_0+f_4M_0\right)$; | $f_1=e^{-\xi}\cos\xi$; $R_2$ — см. в табл. П3.8; $f_2=e^{-\xi}\sin\xi$; $f_3=f_1-f_2$; |

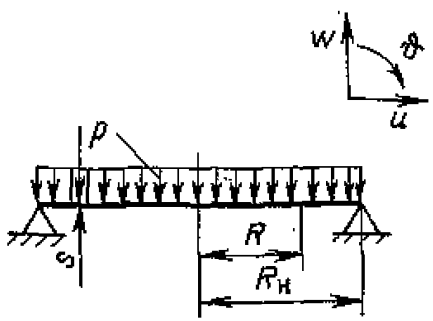
*Продолжение табл. П3.9*

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение, усилие и напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|
| | | $N_\theta = \dfrac{sE}{R_2 \sin\varphi} w + \mu N_\varphi$;<br>$M_\theta = \mu M_\varphi - \dfrac{s^3}{12} \dfrac{\operatorname{ctg}\varphi}{R_2} E\vartheta$;<br>$\sigma_\varphi = \dfrac{N_\varphi}{s} \pm \dfrac{6M_\varphi}{s^2}$;<br>$\sigma_\theta = \dfrac{N_\theta}{s} \pm \dfrac{6M_\theta}{s^2}$ | $f_4 = f_1 + f_2$;<br>$\xi = \beta a \sqrt{\dfrac{a}{b}} \int_0^\omega \sqrt{\eta^5}\, d\omega$;<br>$R_1$, $R_2$, $\eta$, $\omega$ — см. в табл. П3.8 |

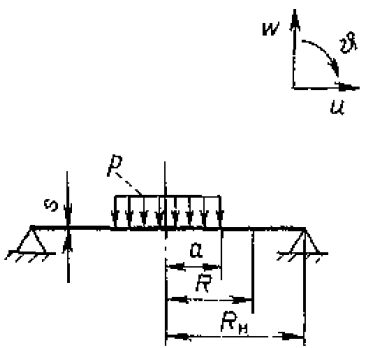
Таблица П3.10. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в круглых сплошных пластинах постоянной толщины, шарнирно опертых по краю. Нагрузка — равномерное давление и осесимметричные перерезывающие и изгибающие усилия**

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
|  | $w=\frac{M_0}{2(1+\mu)D}(R_н^2-R^2)$;<br>$\vartheta=\frac{M_0}{(1+\mu)D}R$;<br>$u=\vartheta z$;<br>$M_r=M_\theta=M_0$;<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{6M_0}{s^2}$ | $w=\frac{M_0R_н^2}{2(1+\mu)D}$;<br>$\vartheta=0$;<br>$u=0$;<br>$M_r=M_\theta=M_0$;<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{6M_0}{s^2}$ | $w=0$;<br>$\vartheta=\frac{M_0R_н}{(1+\mu)D}$;<br>$u=\vartheta z$;<br>$M_r=M_\theta=M_0$;<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{6M_0}{s^2}$ |
|  | $w=-\frac{p}{16\pi D}\left[\frac{3+\mu}{1+\mu}(R_н^2-R^2)+2R^2\ln\frac{R}{R_н}\right]$;<br>$\vartheta=-\frac{pR}{4\pi D}\left(\frac{1}{1+\mu}-\ln\frac{R}{R_н}\right)$;<br>$M_r=-\frac{p(1+\mu)}{4\pi}\ln\frac{R_н}{R}$;<br>$M_\theta=-\frac{p}{4\pi}\left[(1-\mu)+(1+\mu)\ln\frac{R_н}{R}\right]$;<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2}$; $\sigma_\theta=\pm\frac{6M_0}{s^2}$ | $w=-\frac{pR_н^2}{16\pi D}\frac{3+\mu}{1+\mu}$;<br>$\vartheta=0$;<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{p}{s^2}\left[(1+\mu)\times\left(0{,}485\ln\frac{R_н}{s}+0{,}52\right)+0{,}48\right]$ | $w=0$;<br>$\vartheta=-\frac{pR_н}{4\pi(1+\mu)D}$;<br>$M_r=0$;<br>$M_\theta=-\frac{p(1-\mu)}{4\pi}$;<br>$\sigma_r=0$; $\sigma_\theta=\pm\frac{6M_0}{s^2}$ |

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
|  | $R<a$<br>$w=-\frac{p}{8\pi D}\left[\frac{(3+\mu)R_н^2-(1-\mu)R^2}{2(1+\mu)R_н^2}\times\right.$<br>$\left.\times(R_н^2-a^2)+(a^2+R^2)\ln\frac{a}{R_н}\right];$<br>$\vartheta=-\frac{pR}{8\pi D}\left[\frac{1-\mu}{1+\mu}\frac{R_н^2-a^2}{R_н^2}+2\ln\frac{R_н}{a}\right];$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=M_\theta=-\frac{p}{8\pi}\left[(1-\mu)\frac{R_н^2-a^2}{R_н^2}+\right.$<br>$\left.+2(1+\mu)\ln\frac{R_н}{a}\right];$<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{6M_r}{s^2}$ | $w=-\frac{p}{16\pi D}\left[\frac{3+\mu}{1+\mu}(R_н^2-a^2)+\right.$<br>$\left.+2a^2\ln\frac{a}{R_н}\right];$<br>$\vartheta=0;\ u=0;$<br>$M_r=M_\theta=-\frac{p}{8\pi}\left[(1-\mu)\times\right.$<br>$\left.\times\frac{R_н^2-a^2}{R_н^2}+2(1+\mu)\ln\frac{R_н}{a}\right];$<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{6M_r}{s^2}$ | — |
| | $R>a$<br>$w=-\frac{p}{16\pi D}\left[(R_н^2-R^2)\times\right.$<br>$\times\frac{(3+\mu)R_н^2-(1-\mu)a^2}{(1+\mu)R_н^2}+$<br>$\left.+2(a^2+R^2)\ln\frac{R}{R_н}\right];$ | — | $w=0;$<br>$\vartheta=-\frac{p}{4\pi D(1+\mu)}\frac{R_н^2-a^2}{R_н^2};$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $\vartheta=-\frac{p}{8\pi D}\left[\frac{2R_н^2-(1-\mu)a^2}{(1+\mu)R_н^2}-\right.$<br>$\left.-\left(\frac{a}{R}\right)^2+2\ln\frac{R_н}{R}\right];$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=-\frac{p}{8\pi}\left[(1-\mu)\frac{R_н^2-R^2}{R_н R^2}a^2+\right.$<br>$\left.+2(1+\mu)\ln\frac{R_н}{R}\right];$<br>$M_\theta=-\frac{p}{8\pi}\left[(1-\mu)\frac{(R_н^2-a^2)R^2+}{R_н^2R^2}\rightarrow\right.$<br>$\left.\rightarrow\frac{+(R^2-a^2)R_н^2}{}+2(1+\mu)\ln\frac{R_н}{R}\right];$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_0}{s^2}$ | | $M_r=0;$<br>$M_\theta=-\frac{p(1-\mu)}{4\pi}\frac{R_н^2-a^2}{R_н^2};$<br>$\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm 6M_\theta/s^2$ |
|  | $w=-\frac{p}{64D}(R_н^2-R^2)\left(\frac{5+M}{1+\mu}R_н^2-R^2\right);$<br>$\vartheta=-\frac{pR}{16D}\left(\frac{3+\mu}{1+\mu}R_н^2-R^2\right);$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=-\frac{p}{16}(3+\mu)(R_н^2-R^2);$ | $w=-\frac{pR_н^4}{64D}\frac{5+\mu}{1+\mu};$<br>$\vartheta=0;\ u=0;$<br>$M_r=M_\theta=-\frac{pR_н^2}{16}(3+\mu);$ | $w=0;$<br>$\vartheta=-\frac{pR_н^3}{8(1+\mu)D};$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=0;$<br>$M_\theta=-\frac{pR_н^2}{8}(1-\mu);$ |

*Продолжение табл. П3.10*

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
| | $M_\theta=\frac{p}{16}\left[R_н^2(3+\mu)-R^2(1+3\mu)\right];$ $\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $\sigma_r=\sigma_\theta=\pm\frac{6M_r}{s^2}$ | $\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ |
|   | $R<a$ $w=-\frac{pa^2}{64D}\left\{2R^2\left[4\ln\frac{a}{R_н}-\frac{4R_н^2-(1+\mu)}{}\right.\right.$ $\left.\left.\rightarrow\frac{-(1-\mu)a^2}{R_н^2}\right]+\frac{R^4}{a^2}+4a^2\ln\frac{a}{R_н}+\right.$ $\left.+\frac{4(3+\mu)R_н^2-(7+3\mu)a^2}{1+\mu}\right\};$ $\vartheta=-\frac{pa^2R}{16D}\left[\frac{4R_н^2-(1-\mu)a^2}{(1+\mu)R_н^2}+\right.$ $\left.+4\ln\frac{R_н}{a}\left(\frac{R}{a}\right)^2\right];$ $M_r=-\frac{pa^2}{16}\left[\frac{4R_н^2-(1-\mu)a^2}{R_н^2}+\right.$ $\left.+4(1+\mu)\ln\frac{R_н}{a}+(3+\mu)\left(\frac{R}{a}\right)^2\right];$ $M_\theta=-\frac{pa^2}{16}\left[\frac{4R_н^2-(1-\mu)a^2}{R_н^2}+\right.$ | $w=-\frac{pa^2}{64D}\left[\frac{4(3+\mu)R_н^2-}{1+\mu}\rightarrow\right.$ $\left.\rightarrow\frac{-(7+3\mu)a^2}{}+4a^2\ln\frac{a}{R_н}\right];$ $\vartheta=0;$ $M_r=M_\theta=-\frac{pa^2}{16}\left[\frac{4R_н^2-}{R_н^2}\rightarrow\right.$ $\left.\rightarrow\frac{-(1-\mu)a^2}{}+4(1+\mu)\ln\frac{R_н}{a}\right]$ | — |

| | | |
|---|---|---|
| $+4(1+\mu)\ln\frac{R_н}{a}-(1-3\mu)\left(\frac{R}{a}\right)^2\Big];$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | | |
| $R>a$<br>$w=-\frac{pa^2}{16D}\Big[\frac{2(3+\mu)R_н^2-(1-\mu)a^2}{2(1+\mu)R_н^2}\times$<br>$\times(R_н^2-R^2)+(2R^2+a^2)\ln\frac{R}{R_н}\Big];$<br>$\vartheta=-\frac{pa^2}{16D}\Big[\frac{2(3+\mu)R_н^2-(1-\mu)a^2}{(1+\mu)R_н^2}\times$<br>$\times R-\frac{2R^2+a^2}{R}+4R\ln\frac{R_н}{R}\Big];$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=-\frac{pa^2}{16}\Big[(1-\mu)\frac{R_н^2-R^2}{R_н^2R^2}a^2+$<br>$+4(1+\mu)\ln\frac{R_н}{R}\Big];$<br>$M_\theta=-\frac{pa^2}{16}\Big[(1-\mu)\frac{4R_н^2-a^2}{R_н^2}-$<br>$-(1-\mu)\left(\frac{a}{R}\right)^2+4(1+\mu)\ln\frac{R_н}{R}\Big];$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | | $w=0;$<br>$\vartheta=-\frac{pa^2}{8D}\frac{2R_н^2-a^2}{(1+\mu)R_н};$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=0;$<br>$M_\theta=-\frac{pa^2(1-\mu)(2R_н^2-a^2)}{8}\frac{1}{R_н^2};$<br>$\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ |

В табл. П3.9 даны формулы для определения перемещений, усилий и напряжений в эллиптической оболочке от краевых перерезывающих сил и изгибающих моментов.

### 2.3. КРУГЛЫЕ ПЛАСТИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК

В табл. П3.10 приведены формулы для вычисления перемещений, усилий и напряжений в круглых сплошных пластинах, шарнирно опертых по краю, от равномерно распределенной, перерезывающей и изгибающей нагрузок для произвольного сечения и характерных мест (край и центр).

В табл. П3.11 даны формулы для определения перемещений, усилий и напряжений в кольцевых пластинах, шарнирно опертых по наружному контуру, от равномерно распределенной, перерезывающей и изгибающей нагрузок для произвольного сечения и на краях.

В табл. П3.12 представлены формулы для нахождения перемещений, усилий и напряжений в круглых сплошных и кольцевых пластинах от осесимметричной растягивающей нагрузки.

В табл. П3.13 даны формулы для вычисления перемещений, усилий и напряжений в круглых сплошных и кольцевых пластинах от температурных нагрузок (температура меняется по радиусу и толщине пластины).

Формулы применимы, если пластины являются тонкими, т. е. отношение толщины к наружному радиусу не превышает 0,2, и если прогибы малы по сравнению с толщиной пластины.

При расчете перфорированных пластин следует в формулах для перемещений $w$, $\vartheta$ в табл. П3.10, П3.11 вместо $D$ использовать $D_1 = D\varphi_и$, для перемещений $u$ в табл. П3.12 в знаменателе добавить $\varphi_с$, для напряжений (табл. П3.10—П3.12) в знаменателе добавить $\varphi_и$.

В случае равномерной перфорации по всей поверхности пластины (разбивка отверстий треугольная или квадратная) коэффициент ослабления определяется по следующим зависимостям:

а) при расчете перемещений при изгибе

$$\varphi_и = 1{,}18\,(t-d)/t;$$

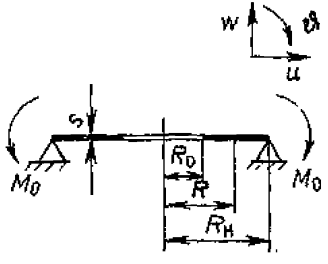
б) при расчете перемещений при растяжении (сжатии) пластины в радиальном направлении

$$\varphi_с = (t-d)/t;$$

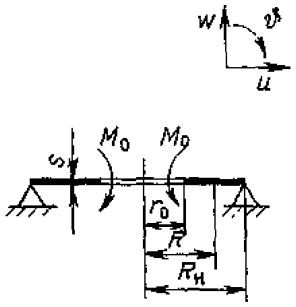
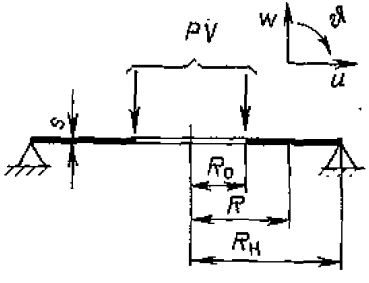
в) при расчете напряжений

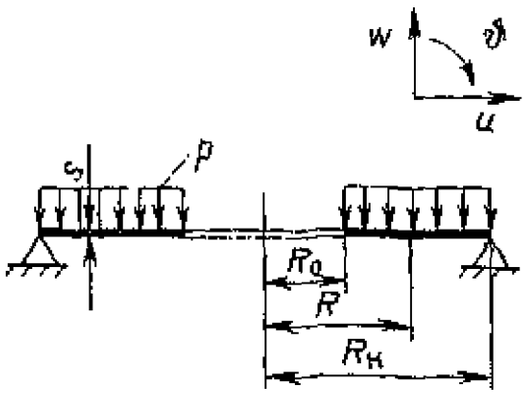
$$\varphi_и = (t-d)/t.$$

Таблица П3.11. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в кольцевых пластинах постоянной толщины, шарнирно опертых по наружному контуру. Нагрузка — равномерное давление и осесимметричные перерезывающие и изгибающие усилия**

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | на внутреннем крае ($R=R_0$) | на наружном крае ($R=R_н$) |
|  | $w=\frac{M_0R_н^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\left[\frac{R_н^2-R^2}{2(1+\mu)}+\frac{R_0^2}{1-\mu}\ln\frac{R_н}{R}\right];$<br>$\vartheta=\frac{M_0R_н^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\left[\frac{R}{1+\mu}+\frac{R_0^2}{1-\mu}\frac{1}{R}\right];$<br>$u=\vartheta r;$<br>$M_r=\frac{M_0R_н^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R^2-R_0^2}{R^2};$<br>$M_\theta=\frac{M_0R_н^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R^2+R_0^2}{R^2};$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $w=\frac{M_0R_н^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\left[\frac{R_н^2-R_0^2}{2(1+\mu)}+\frac{R_0^2}{1-\mu}\ln\frac{R_н}{R_0}\right];$<br>$\vartheta=\frac{M_0R_н^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\frac{2R_0}{1-\mu^2};$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=0;$<br>$M_\theta=\frac{2M_0R_н^2}{R_н^2-R_0^2}$<br>$\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $w=0;$<br>$\vartheta=\frac{M_0R_н}{D(R_н^2-R_0^2)}\times\frac{(R_н^2+R_0^2)-\mu(R_н^2-R_0^2)}{1-\mu^2};$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=M_0;$<br>$M_\theta=M_0\frac{R_н^2+R_0^2}{R_н^2-R_0^2};$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ |
| | $w=-\frac{M_0R_0^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\left[\frac{R_н^2-R^2}{2(1+\mu)}+\frac{R_н^2}{1-\mu}\ln\frac{R_н}{R}\right];$ | $w=-\frac{M_0R_0^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\left[\frac{R_н^2-R_0^2}{2(1+\mu)}+\frac{R_н^2}{1-\mu}\ln\frac{R_н}{R_0}\right];$ | $w=0;$ |

*Продолжение табл. П3.11*

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | на внутреннем крае ($R=R_0$) | на наружном крае ($R=R_н$) |
|  | $\vartheta=-\frac{M_0R_0^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\left(\frac{R}{1+\mu}+\frac{R_н^2}{1-\mu}\frac{1}{R}\right)$;<br>$u=\vartheta z$;<br>$M_r=\frac{M_0R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R_н^2-R^2}{R^2}$;<br>$M_\theta=-\frac{M_0R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R_н^2+R^2}{R^2}$;<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2}$; $\sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $\vartheta=-\frac{M_0R_0}{D(R_н^2-R_0^2)}\times$<br>$\times\frac{(R_н^2+R_0^2)+\mu(R_н^2-R_0^2)}{1-\mu^2}$;<br>$u=\vartheta z$;<br>$M_r=M_0$;<br>$M_\theta=-\frac{R_н^2+R_0^2}{R_н^2-R_0^2}M_0$;<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2}$; $\sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $\vartheta=-\frac{M_0R_0^2}{D(R_н^2-R_0^2)}\frac{2R_н}{1-\mu^2}$;<br>$u=\vartheta z$;<br>$M_r=0$;<br>$M_\theta=-\frac{2M_0R_0^2}{R^2+R_0^2}$;<br>$\sigma_r=0$; $\sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ |
|  | $w=-\frac{p}{8\pi D}\left[\left(\frac{3+\mu}{2(1+\mu)}+\frac{R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\times\right.\right.$<br>$\left.\times\ln\frac{R_н}{R_0}\right)(R_н^2-R^2)+\left(\frac{1+\mu}{1-\mu}\times\right.$<br>$\left.\left.\times\frac{2R_н^2R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\right)\ln\frac{R_н}{R}-R^2\ln\frac{R_н}{R}\right]$;<br>$\vartheta=-\frac{p}{4\pi D}\left[\frac{R}{1+\mu}+R\ln\frac{R_н}{R}+\right.$<br>$\left.+\frac{R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{(R_н^2+R^2)+\mu(R_н^2-R^2)}{(1-\mu)R}\times\right.$ | $w=-\frac{p}{8\pi D}\left[\frac{3+\mu}{2(1+\mu)}(R_н^2-R_0^2)+\right.$<br>$\left.+\frac{1+\mu}{1-\mu}\frac{2R_н^2R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\left(\ln\frac{R_н}{R_0}\right)^2\right]$;<br>$\vartheta=-\frac{pR_0}{4\pi D}\left[\frac{1}{1+\mu}+\right.$<br>$\left.+\frac{2R^2}{(R_н^2-R_0^2)(1-\mu)}\ln\frac{R_н}{R_0}\right]$; | $w=0$;<br>$\vartheta=-\frac{pR_н}{4\pi D}\left[\frac{1}{1+\mu}+\right.$<br>$\left.+\frac{2R_0^2}{(1-\mu)(R_н^2-R_0^2)}\ln\frac{R_н}{R_0}\right]$; |

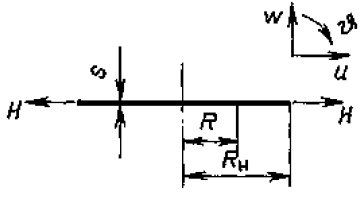
| | | | |
|---|---|---|---|
| | $\times \ln \frac{R_н}{R_0}\Big];$<br>$u=\vartheta z;$<br>$M_r=\frac{p(1+\mu)}{4\pi}\Big[\frac{R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\times$<br>$\times\frac{R_н^2-R^2}{R^2}\ln\frac{R_н}{R_0}-\ln\frac{R_н}{R}\Big];$<br>$M_\theta=\frac{p(1+\mu)}{4\pi}\Big[\frac{1+\mu}{1+\mu}+\frac{R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\times$<br>$\times\frac{R_н^2-R_0^2}{R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}+\ln\frac{R_н}{R_0}\Big];$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $u=\vartheta z;$<br>$M_r=0;$<br>$M_\theta=\frac{p(1+\mu)}{4\pi}\Big[\frac{1-\mu}{1+\mu}+$<br>$+\frac{2R^2}{R_н^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\Big];$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $u=\vartheta z;$<br>$M_r=0;$<br>$M_\theta=\frac{p(1+\mu)}{4\pi}\Big[\frac{1-\mu}{1+\mu}+$<br>$+\frac{2R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\Big];$<br>$\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ |
|  | $w=-\frac{p}{64D}\Big\{\frac{2(3+\mu)}{1+\mu}(R_н^2+R_0^2)\times$<br>$\times(R_н^2-R^2)+\frac{4(3+\mu)}{1-\mu}R_н^2R_0^2\ln\frac{R_н}{R}+$<br>$+8R_н^2R_0^2\Big(\ln\frac{R_н}{R_0}-1\Big)-\frac{4(1-\mu)}{1+\mu}\times$<br>$\times(R_н^2-R^2)R_0^2-(R_н^4-R^4)-8R_0^2R^2\times$<br>$\times\Big(\ln\frac{R}{R_0}-1\Big)-\frac{8R_н^2R_0^4}{R_н^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\times$<br>$\times\Big[\frac{R_н^2-R^2}{R_0^2}+\frac{2(1+\mu)}{1-\mu}\ln\frac{R_н}{R}\Big]\Big\};$ | $w=-\frac{pR_0^2}{16D}\Big[\frac{5+\mu}{4(1+\mu)}\frac{R_н^4-R_0^4}{R_0^2}+$<br>$+\frac{(3+\mu)(R_н^2-R_0^2)-4R_0^2\times}{(1-\mu)(R_н^2-R_0^2)}\times$<br>$\times(1+\mu)\ln\frac{R_н}{R_0}R_н^2\ln\frac{R_н}{R_0}-$<br>$-\frac{3+\mu}{1+\mu}(R_н^2-R_0^2)\Big];$ | $w=0;$ |

*Продолжение табл. П3.11*

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | на внутреннем крае ($R=R_0$) | на наружном крае ($R=R_н$) |
| | $\vartheta=-\frac{p}{16D}\left\{\frac{3+\mu}{1-\mu}\frac{R_н^2R_0^2}{R}+\right.$ $+\frac{(3+\mu)(R_н^2+R_0^2)-2(1-\mu)R_0^2}{1+\mu}R-$ $-\left[R^2+2R_0^2\left(1-\ln\frac{R}{R_0}\right)\right]R-$ $\left.-\frac{4R_н^2R_0^3}{R_н^2-R_0^2}\left(\frac{R}{R_0}+\frac{1+\mu}{1-\mu}\frac{R_0}{R}\right)\ln\frac{R_н}{R_0}\right\};$ | $\vartheta=-\frac{pR_0}{8D(1-\mu)}\left[\frac{(3+\mu)R_н^2-}{1+\mu}\rightarrow\right.$ $\left.\rightarrow\frac{-(1-\mu)R_0^2}{}-\frac{4R_н^2R_0^2}{R^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\right];$ | $\vartheta=-\frac{pR_н}{8D}\times$ $\times\left\{\frac{(1-\mu)R_н^2+(1+3\mu)R_0^2}{1-\mu^2}+\right.$ $+R_0^2\ln\frac{R_н}{R_0}-\frac{2R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\times$ $\times\left[(1-\mu)R_н^2+(1+\mu)R_0^2\right]\times$ $\left.\times\ln\frac{R_н}{R_0}\right\};$ |
| | $u=\vartheta z;$ | $u=\vartheta z;$ | $u=\vartheta z;$ |
| | $M_r=\frac{p(1+\mu)}{4}\left[R_0^2\ln\frac{R}{R_0}+\frac{3+\mu}{4(1+\mu)}\times\right.$ $\times\frac{(R^2-R_0^2)(R_н^2-R^2)}{R^2}-\frac{R^2-R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\times$ $\left.\times\frac{R_н^2R_0^2}{R^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\right];$ | $M_r=0;$ | $M_r=0;$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $M_\theta=\frac{p(1+\mu)}{4}\left\{R_0^2\ln\frac{R}{R_0}\frac{R^2+R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\times\right.$<br>$\times\frac{R_н^2R_0^2}{R^2}\ln\frac{R_н}{R_0}+\frac{1}{4(1+\mu)}\Big[(3+\mu)\times$<br>$\times\frac{R_н^2(R^2+R_0^2)}{R^2}+R_0^2(5\mu-1)-$<br>$\left.-(1+3\mu)R^2\Big]\right\};$<br>$\sigma_r=\pm\frac{6M_r}{s^2};\ \sigma_\theta=\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $M_\theta=\frac{p(1+\mu)}{2}\times$<br>$\times\left[\frac{(3+\mu)R_н^2-(1-\mu)R_0^2}{4(1+\mu)}-\right.$<br>$\left.-\frac{R_н^2R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R_0}\right];$<br>$\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ | $M_\theta=\frac{p(1+\mu)}{2}\times$<br>$\times\left[\frac{(1-\mu)R_н^2+(1+\mu)R_0^2}{4(1+\mu)}-\right.$<br>$\left.-\frac{R_0^4}{R_н^2-R_0^2}\ln\frac{R_н}{R}\right];$<br>$\sigma_r=0;\ \sigma_\theta=\pm\frac{6M_\theta}{s^2}$ |

Таблица П3.12. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в круглых сплошных и кольцевых пластинах постоянной толщины. Нагрузка — осесимметричные растягивающие усилия**

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
|  | $u=\frac{1-\mu}{Es}HR;$<br>$H_r=H_\theta=H;$<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=H/s$ | — | $u=\frac{1-\mu}{Es}HR_н;$<br>$H_r=H_\theta=H;$<br>$\sigma_r=\sigma_\theta=H/s$ |

*Продолжение табл. П3.12*

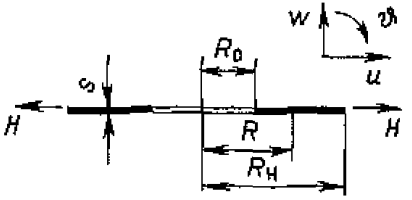
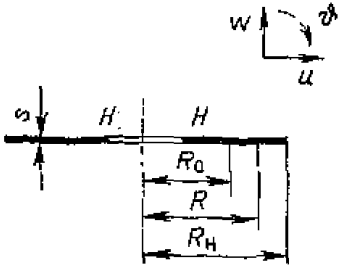
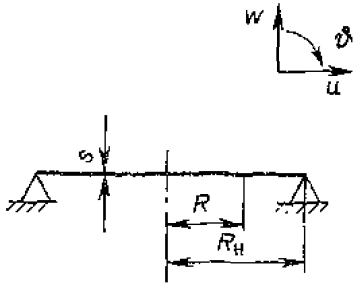
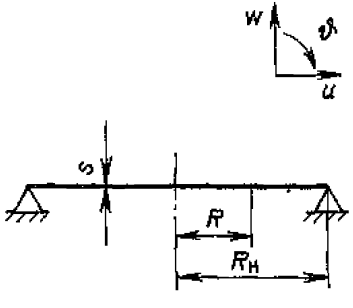
| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
|  | $u=\frac{HR_н^2}{Es(R_н^2-R^2)}\left[(1-\mu)R+(1+\mu)\frac{R_0^2}{R}\right];$<br>$H_r=\frac{HR_н^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R^2-R_0^2}{R^2};\ \sigma_r=\frac{H_r}{s};$<br>$H_\theta=\frac{HR_н^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R^2+R_0^2}{R^2};\ \sigma_\theta=\frac{H_\theta}{s}$ | $u=\frac{2HR_н^2R_0}{Es(R_н^2-R_0^2)};$<br>$H_r=0;\ \sigma_r=\frac{H_r}{s};$<br>$H_\theta=\frac{2HR_н^2}{R_н^2-R_0^2};\ \sigma_\theta=\frac{H_\theta}{s}$ | $u=\frac{HR_н}{Es(R_н^2-R_0^2)}\times$<br>$\times\left[(1-\mu)R_н^2+(1+\mu)R_0^2\right];$<br>$H_r=H;\ \sigma_r=\frac{H_r}{s};$<br>$H_\theta=H\frac{R_н^2+R_0^2}{R_н^2-R_0^2};\ \sigma_\theta=\frac{H_\theta}{s}.$ |
|  | $u=-\frac{pR_0^2}{Es(R_н^2-R_0^2)}\left[(1-\mu)R+(1+\mu)\frac{R_н^2}{R}\right];$<br>$H_r=\frac{HR_0^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R_н^2-R^2}{R^2};\ \sigma_r=\frac{H_r}{s};$<br>$H_\theta=-\frac{HR_0^2}{R_н^2-R_0^2}\frac{R_н^2+R^2}{R^2};\ \sigma_\theta=\frac{H_\theta}{s}$ | $u=-\frac{HR_0}{Es(R_н^2-R_0^2)}\left[(1+\mu)R_н^2+(1-\mu)R_0^2\right];$<br>$H_r=H;\ \sigma_r=\frac{H_r}{s};$<br>$H_\theta=-H\frac{R_н^2+R_0^2}{R_н^2-R_0^2};\ \sigma_\theta=\frac{H_\theta}{s}$ | $u=-\frac{2HR_нR_0^2}{Es(R_н^2-R_0^2)};$<br>$H_r=0;\ \sigma_r=0;$<br>$H_\theta=-\frac{2HR_0^2}{R_н^2-R_0^2};\ \sigma_\theta=\frac{H_\theta}{s}$ |

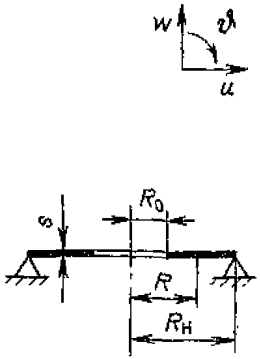
Таблица П3.13. **Формулы для перемещений, усилий и напряжений в круглых сплошных и кольцевых пластинах. Нагрузка — температурное поле**

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
| Сплошная круглая пластина с радиальным изменением температур $t(R)$   | $u=\frac{\alpha}{R}\left[(1+\mu)\int_0^R t(R)\,RdR+\right.$<br>$\left.+(1-\mu)\left(\frac{R}{R_н}\right)^2\int_0^{R_н} t(R)\,RdR\right];$<br>$w=\vartheta=0;$<br>$N_r^t=\alpha Es\left[\frac{1}{R_н^2}\int_0^{R_н} t(R)\,RdR-\right.$<br>$\left.-\frac{1}{R^2}\int_0^R t(R)\,RdR\right];$<br>$N_\theta^t=\alpha Es\left[\frac{1}{R_н^2}\int_0^{R_н} t(R)\,RdR+\right.$<br>$\left.+\frac{1}{R^2}\int_0^R t(R)\,RdR-t(R)\right];$ | $u=0;$<br>$w=0;$<br>$\vartheta=0;$<br>$N_r^t=N_\theta^t=\alpha Es\left[\frac{1}{R^2}\int_0^{R_н} t(R)\times\right.$<br>$\left.\times RdR-\frac{t(0)}{2}\right];$<br>$M_r^t=M_\theta^t=0;$ | $u=\frac{2\alpha}{R}\int_0^{R_ц} t(R)\,RdR;$<br>$w=0;$<br>$\vartheta=0;$<br>$N_\theta^t=\alpha Es\left[\frac{2}{R_н^2}\int_0^{R_н} t(R)\,RdR-\right.$<br>$\left.-t(R_н)\right];$<br>$M_r^t=M_\theta^t=N_r^t=0;$ |

*Продолжение табл. П3.13*

| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
| | $M_r^t=M_\theta^t=0;$ $\sigma_r^t=\frac{N_r^t}{s};\ \sigma_\theta^t=\frac{N_\theta^t}{s}$ | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{N_r^t}{s}$ | $\sigma_\theta^t=\frac{N_\theta^t}{s}$ |
| Сплошная круглая пластина с изменением температуры по толщине по произвольному закону   | $M_\theta^t=M_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)z\,dz;$ $N_\theta^t=N_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)\,dz;$ $w=\frac{6M_r^t}{Es^3}(R_н^2-R^2);$ $\vartheta=\frac{12M_r^t}{Es^3}R;\ u=\frac{N_r^tR}{Es}+\vartheta z;$ $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{1}{1-\mu}\left(\frac{6M_r^t}{s^2}+\frac{N_r^t}{s}-\alpha Et(R)\right)$ | $M_\theta^t=M_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)z\,dz;$ $N_\theta^t=N_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)\,dz;$ $w=\frac{6M_r^t}{Es^3}R_н^2;$ $\vartheta=u=0;$ $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{1}{1-\mu}\left(\frac{6M^t}{s^2}+\frac{N_r^t}{s}-\alpha Et(0)\right)$ | $M_\theta^t=M_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)z\,dz;$ $N_\theta^t=N_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)\,dz;$ $u=\frac{N_r^tR}{Es}+\vartheta z;\ w=0;$ $\vartheta=\frac{12M_r^t}{Es^3}R_н;$ $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{1}{1-\mu}\left(\frac{6M_r^t}{s^2}+\frac{N_r^t}{s}-\alpha Et(R_н)\right)$ |
| Сплошная круглая пластина с изменением температуры по толщине по линейному закону | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=0$ Перемещения и усилия рассчитывают по формулам для сплошной круглой пластины с изменением температуры по толщине по произвольному закону | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=0$ | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=0$ |

Кольцевая круглая пластина с радиальным изменением температур $t(R)$




$$u=\frac{\alpha}{R}\left[(1+\mu)\int_{R_0}^{R} t(R)\,RdR+\right.$$
$$\left.+\frac{(1-\mu)R^2+(1+\mu)R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} t(R)\,RdR\right];$$

$$w=\vartheta=0;$$

$$N_\theta^t=\frac{\alpha Es}{R^2}\left[\frac{R^2+R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} t(R)\,RdR+\right.$$
$$\left.+\int_{R_0}^{R} t(R)\,RdR-t(R)\,R^2\right];$$

$$M_r^t=M_\theta^t=0;$$

$$\sigma_r^t=\frac{N_r^t}{s};$$

$$\sigma_\theta^t=\frac{N_\theta^t}{s};$$

$$N_r^t=\frac{\alpha Es}{R^2}\left[\frac{R^2-R_0^2}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} f(R)\,RdR-\right.$$
$$\left.-\int_{R_0}^{R} t(R)\,RdR\right]$$

$$u=\frac{2\alpha R_0}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} t(R)\,RdR;$$

$$w=\vartheta=0;$$

$$N_r^t=0;$$

$$N_\theta^t=\frac{2\alpha Es}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} t(R)\,RdR-$$
$$-t(R_0)\alpha Es;$$

$$M_r^t=M_\theta^t=0;$$

$$\sigma_r^t=0;$$

$$\sigma_\theta^t=\frac{N_\theta^t}{s}$$

$$u=\frac{2\alpha R_н}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} t(R)\,RdR;$$

$$w=\vartheta=0;$$

$$N_r^t=0;$$

$$N_\theta^t=\frac{2\alpha Es}{R_н^2-R_0^2}\int_{R_0}^{R_н} t(R)\,RdR-$$
$$-t(R_н)\alpha Es;$$

$$M_r^t=M_\theta^t=0;$$

$$\sigma_r^t=0;$$

$$\sigma_\theta^t=\frac{N_\theta^t}{s}$$

*Продолжение табл. П3.13*

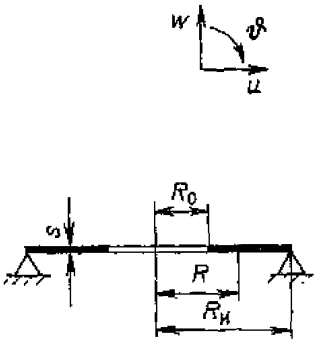
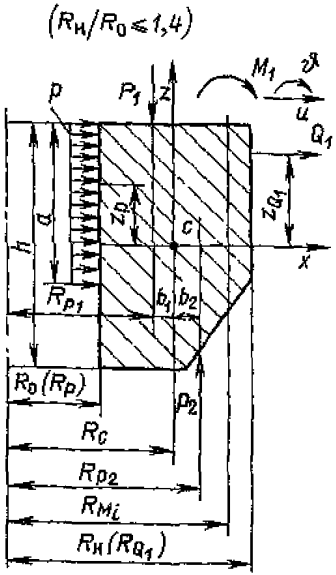
| Расчетная схема | Перемещение, усилие и напряжение | | |
|---|---|---|---|
| | в произвольном сечении | в центре | на краю |
| Кольцевая круглая пластина с изменением температуры по толщине по произвольному закону $t(z)$   | $M_\theta^t=M_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)z\,dz;$<br>$N_\theta^t=N_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)\,dz;$<br>$w=\frac{6M_r^t}{Es^3}(R_н^2-R^2);$<br>$\vartheta=\frac{12M_r^t}{Es^3}R;$<br>$u=\frac{N_r^tR}{Es}+\vartheta z;$<br>$\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{1}{1-\mu}\left(\frac{6M_r^t}{s^2}+\frac{N_r^t}{s}-\alpha Et(R)\right)$ | $M_\theta^t=M_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)z\,dz;$<br>$N_\theta^t=N_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)\,dz;$<br>$w=\frac{6M_r^t}{Es^3}(R_н^2-R_0^2);$<br>$\vartheta=\frac{12M_r^t}{Es^3}R_0;$<br>$u=0;$<br>$\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{1}{1-\mu}\left(\frac{6M_r^t}{s^2}+\frac{N_r^t}{s}-\alpha Et(R_0)\right)$ | $M_\theta^t=M_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)z\,dz;$<br>$N_\theta^t=N_r^t=\alpha E\int\limits_{-s/2}^{s/2}t(z)\,dz;$<br>$u=\frac{N_r^tR_н}{Es}+\vartheta z;$<br>$\vartheta=\frac{12M_r^t}{Es^3}R_н;$<br>$w=0;$<br>$\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=\frac{1}{1-\mu}\left(\frac{6M_r^t}{s^2}+\frac{N_r^t}{s}-\alpha Et(R_н)\right)$ |
| Кольцевая круглая пластина с изменением температуры по толщине по линейному закону | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=0$ | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=0$ | $\sigma_r^t=\sigma_\theta^t=0$ |
| | Перемещения и усилия рассчитывают по формулам для кольцевой пластины с изменением по толщине по произвольному закону $t(z)$ | | |

Таблица П 3.14. **Формулы для определения перемещений и напряжений в кольце от силовых нагрузок**

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Кольцо, в сечении имеющее произвольную форму и нагруженное распределенными нагрузками<br>$(R_н/R_0 \leqslant 1{,}4)$<br><br> | Проходящее через центр тяжести | $u_c = \frac{R_c}{EF}(N_c R_c)$ | $\sigma_\vartheta = \frac{(N_c R_c)}{F}$ | $F = \int_F dF;$ |
| | Произвольное | $\vartheta = \frac{R_c}{E_c \mathcal{J}_x}(M_c R_c);$<br>$u = u_c + \vartheta z$ | $\sigma_\vartheta = \frac{(N_c R_c)}{F} + z\frac{(M_c R_c)}{\mathcal{J}_x}$ | $\mathcal{J}_x = \int_F z^2 dF;$ |

*Продолжение табл. П3.14*

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Перемещение | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Расчетная схема та же $\left(\frac{R_н}{R_0}>1{,}4\right)$ | Проходящее через центр тяжести | $u_c=\frac{R_c}{EF}(N_cR_c)$ | $\sigma_\theta=\frac{(N_cR_c)}{F}$ | $F=R_c\int_F\frac{1}{R}dF;$ $\mathcal{J}_x=R_c\int_F\frac{z^2}{R}dF$ |
| | Произвольное | $\vartheta=\frac{R_c}{E_Bc\mathcal{J}_x}(M_cR_c);$ $u=u_c+\vartheta z$ | $\sigma_\theta=\frac{R_c(N_cR_c)}{R\quad F}+z\frac{R_c(M_cR_c)}{R\quad\mathcal{J}_x}$ | |

Таблица П 3.15. **Формулы для определения перемещений и напряжений в кольце от температурных нагрузок**

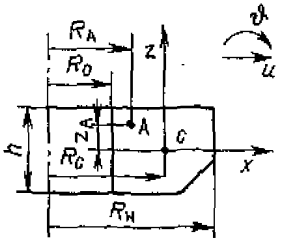
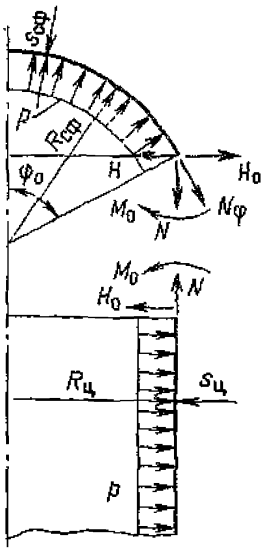
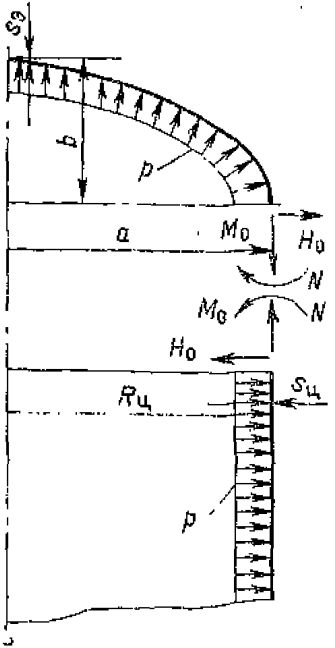
| Расчетная схема. Вид нагрузок | Координата | Перемещение | Напряжение |
|---|---|---|---|
| Кольцо в сечении имеет произвольную форму и произвольное распределение температур $t(x, z)$<br>$\frac{R_н}{R_0} \leqslant 1{,}6;\ \frac{h}{R_0} \leqslant 0{,}6$<br> | Произвольная точка $A$ | $u_A = u_c + \vartheta z_A + \alpha t_c x_A;$<br>$u_c = \frac{\int_F \alpha E t dF}{\int_F E dF} R_c;$<br>$\vartheta = \frac{\int_F \alpha E t z dF}{\int_F E z^2 dF} R_c$ | $\sigma_\theta = \left(\frac{u_A}{R_A} - \alpha t_A\right) E_A$ |
| Расчетная схема та же $\frac{R_н}{R_0} \leqslant 3;\ \frac{h}{R_0} \leqslant 0{,}6$ | | $u_A = u_c + \vartheta z_A + \alpha t_c x_A + \left(\frac{d(\alpha t)}{dx}\right)_c \frac{x_A^2}{2};$<br>$u_c = \frac{\int_F \alpha E t dF}{\int_F \frac{E}{R_A} dF};$<br>$\vartheta = \frac{\int_F \alpha E t z dF}{\int_F \frac{E z^2}{R_A} dF}$ | $\sigma_\theta = \left(\frac{u_A}{R_A} - \alpha t_A\right) E_A$ |

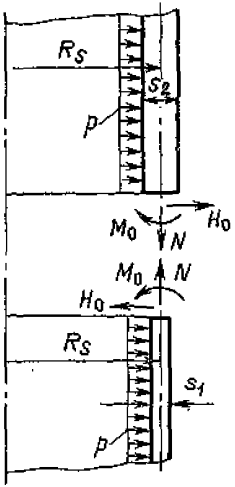
Таблица П 3.16. **Формулы для определения усилий и напряжений в простейших составных конструкциях от действия внутреннего давления**

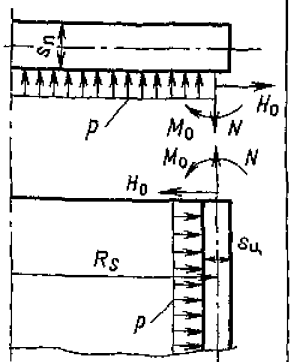
| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Краевое усилие | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Соединение цилиндрической оболочки со сферическим сегментом | Стык цилиндра со сферическим сегментом | $M_0=-\dfrac{H_0(f_1^2-1)+H}{2\beta\left(f_1^2+\dfrac{1}{\sqrt{f_1\sin\varphi_0}}\right)}$; $H_0=\dfrac{A+Б}{4\beta B}$, где $A=pf_1^2\left(2-\mu-\dfrac{1-\mu}{f_2}\right)$; $Б=4\beta\sqrt{f_2}H\left[1+\dfrac{f_1^2-1}{2\left(f_1^2\sqrt{f_2}+1\right)}\right]$; $B=f_1^2+\sqrt{f_2}-\dfrac{(f_1^2-1)^2\sqrt{f_2}}{2\left(f_1^2\sqrt{f_2}+1\right)}$; $f_2=f_1\sin\varphi_0$ | Сферический сегмент ($\varphi=\varphi_0$): $\sigma_\varphi=\dfrac{pR_{c\varphi}}{2s_{c\varphi}}+\dfrac{\cos\varphi_0}{s_{c\varphi}}(H_0-H)\pm\dfrac{6M_0}{s_{c\varphi}^2}$; $\sigma_\theta=\dfrac{pR_{c\varphi}}{2s_{c\varphi}}+\dfrac{2\lambda\sin\varphi_0}{s_{c\varphi}}\times(H_0-H)-\dfrac{2\lambda^2}{s_{c\varphi}R_{c\varphi}}M_0\pm\pm\mu\dfrac{6M_0}{s_{c\varphi}^2}$ Цилиндр ($x=0$): $\sigma_z=\dfrac{pR_ц}{2s_ц}\pm\dfrac{6M_0}{s_ц^2}$; $\sigma_\theta=\dfrac{pR_ц}{s_ц}-\dfrac{2\beta R_ц}{s_ц}(H_0+\beta M_0)\pm\mu\dfrac{6M_0}{s_ц^2}$ | $H=\dfrac{pR_{c\varphi}}{2}\cos\varphi_0$; $\beta=\dfrac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_ц s_ц}}$; $f_1=\dfrac{s_{c\varphi}}{s_ц}$; $\lambda=\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}\sqrt{\dfrac{R_{c\varphi}}{s_{c\varphi}}}$ |

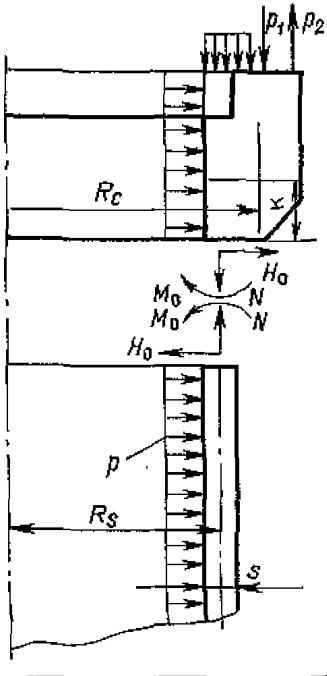


| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Краевое усилие | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Соединение цилиндрической оболочки с *полуэллипсоидом*  | Стык цилиндра с полуэллипсоидом | $M_0=-\dfrac{(f_1^2-1)\sqrt{f_1}}{2\beta(f_1^2\sqrt{f_1}+1)}H_0;$<br>$H_0=\dfrac{p}{4\beta}\dfrac{(2-\mu-m^2)-f_1(2-\mu)}{f_1+\dfrac{1}{\sqrt{f_1}}-\dfrac{(f_1^2-1)^2}{2(f_1^3+\sqrt{f_1})}}$<br>При $f_1=1$ $(s_э=s_ц)$<br>$M_0=0;$<br>$H_0=\dfrac{pm^2}{8\beta}$ | Эллиптическая оболочка:<br>$\sigma_\varphi=\dfrac{pa}{2s_э}\pm\dfrac{6M_0}{s_э^2};$<br>$\sigma_\theta=\dfrac{pa}{2s_э}(2-m^2)+$<br>$+\dfrac{2\beta a}{s_э}(H_0-\beta M_0)\pm$<br>$\pm\mu\dfrac{6M_0}{s_э^2}$<br>Цилиндр:<br>$\sigma_z=\dfrac{pR_ц}{2s_ц}\pm\dfrac{6M_0}{s_ц^2};$<br>$\sigma_\theta=\dfrac{pR_ц}{s_ц}-\dfrac{2\beta R_ц}{s_ц}(H_0+\beta M)\pm$<br>$\pm\mu\dfrac{6M_0}{s_ц^2}$ | $\beta=\dfrac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_ц s_ц}};$<br>$f_1=s_э/s_ц;$<br>$a=R_ц;$<br>$m=a/b$ |

*Продолжение табл. П 3.16*

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Краевое усилие | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Соединение цилиндрических оболочек разной толщины<br> | Стык цилиндров | $M_0=-\frac{1}{2\beta_1}\frac{f_1^2-1}{f_1^2+\frac{1}{\sqrt{f_1}}}H_0$;<br>$H_0=\frac{p(2-\mu)f_1(f_1-1)}{4\beta\left[f_1^2+\sqrt{f}-\frac{(f_1^2-1)^2\sqrt{f_1}}{2(f_1^2\sqrt{f_1}+1)}\right]}$ | $\sigma_z=\frac{N_x}{s_i}\pm\frac{6M_0}{s_i^2}$;<br>$\sigma_\theta=\frac{N_\theta^{p_1H_0,M_0}}{s_i}\pm\mu\frac{6M_0}{s_i^2}$,<br>$N_x=N=\frac{pR_{cp}}{2}$ — для обоих цилиндров;<br>$N_\theta^{p_1H_0,M_0}=pR_s-$<br>$-2\beta_1R_{cp}(H_0+\beta_1M_0)$ — для цилиндра с толщиной $s_1$;<br>$N_\theta^{p_1H_0,M_0}=pR_s+$<br>$+2\beta_2R_s(H_0-\beta_2M_0)$ — для цилиндра с толщиной $s_2$ | $\beta_1=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_ss_1}}$;<br>$f_1=\frac{s_2}{s_1}$;<br>$N=\frac{pR_s}{2}$;<br>$\beta_2=\frac{\beta_1}{\sqrt{f_1}}$ |

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Краевое усилие | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Соединение цилиндрической оболочки с пластиной<br><br> | Стык элементов | $H_0=\frac{pR_s}{2}\frac{cd+be}{ac-b^2}$;<br>$M_0=-\frac{pR_s}{2}\frac{ae+bd}{ac-b^2}$ | Цилиндр:<br>$\sigma_z=\frac{pR_s}{2s_ц}\pm\frac{6M_0}{s_ц^2}$;<br>$\sigma_\theta=\frac{pR_s}{s_ц}-\frac{2\beta R_s}{s_ц}\times$<br>$\times(H_0+\beta M_0)\pm\mu\frac{6M_0}{s_ц^2}$ | $a=\frac{4(1-\mu)}{f_1}+2\beta R_s$;<br>$b=2\beta^2 R_s-\frac{6(1-\mu)}{f_1^2 s_ц}$;<br>$c=4\beta^3 R_s+\frac{12(1-\mu)}{f_1^3 s_ц^2}$;<br>$d=(2-\mu)+\frac{3(1-\mu)}{2f_1^2 s_ц}R_s$;<br>$e=\frac{3(1-\mu)}{f_1^3 s_ц^2}R_s$;<br>$f_1=\frac{s_п}{s_ц}$;<br>$\beta=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{Rs_ц}}$ |

| Расчетная схема | Рассматриваемое сечение | Краевое усилие | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Соединение цилиндрической оболочки с кольцом   | Стык элементов | $H_0=\frac{cd-be}{ac-b^2}$; $M_0=\frac{ae-bd}{ac-b^2}$ | $\sigma_z=\frac{pR_s}{2s}\pm\frac{6M_0}{s^2}$; $\sigma_\theta=\frac{pR_s}{s}-\frac{2\beta R_s}{s}(H_0+\beta M_0)\pm$ $\pm\mu\frac{6M_0}{s^2}$ | Для $\frac{R_{нар}}{R_{вн}}\leqslant 1{,}4$ (см. разд. 2.4) $a=2\beta R_s+\frac{R_c}{F}s+\frac{R_c}{\mathscr{J}_x}k^2 s$; $b=2\beta^2 R_s-\frac{R_c}{\mathscr{J}_x}ks$; $c=4\beta^3 R_s+\frac{R_c}{\mathscr{J}_x}s$; $d=\frac{2-\mu}{2}pR_s-\frac{R_c}{F}\frac{s}{R}(NR_c)+$ $+\frac{R_c}{\mathscr{J}_x}\frac{s}{R}k(MR_c)$; $e=-\frac{R_c}{\mathscr{J}_x}\frac{s}{R_s}(MR_c)$; $\beta=\frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{R_s s}}$; $(NR_c)$ и $(MR_c)$ определяются согласно разд. 2.4 |

Если отверстия имеют неодинаковый диаметр или расположены неравномерно, то при определении коэффициентов ослабления рассматривается наиболее ослабленный диаметр пластины или ряд отверстий, расположенных вблизи диаметра. Имеем соответственно

$$\varphi_{\text{и}} = 1{,}18\,\frac{2(R_{\text{н}} - R) - \sum d_i}{2(R_{\text{н}} - R)},$$

$$\varphi_{\text{с}} = \varphi_{\text{н}} = \frac{2(R_{\text{н}} - R) - \sum d_i}{2(R_{\text{н}} - R)},$$

где $d_i$ — диаметры отверстий, расположенных в рассматриваемом ряду. При этом предполагается, что в пластине сохраняется равномерное ослабление.

### 2.4. КОЛЬЦЕВЫЕ ДЕТАЛИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК

В табл. П 3.14 приведены формулы для перемещений и напряжений при действии на кольцо силовых нагрузок.

Внутренние усилия, действующие в поперечном сечении кольца (применительно к расчетной схеме в табл. П 3.14),

$$(N_c R_c) = \sum_{i=1}^{n_1} Q_i R_{Q_i} + \sum_{i=1}^{n_2} p_i a_i R_{p_i};$$

$$(M_c R_c) = \sum_{i=1}^{n_3} M_i R_{M_i} + \sum_{i=1}^{n_2} p_i a_i z_{p_i} R_{p_i} + \sum_{i=1}^{n_4} P_i b_i R_{P_i} + \sum_{i=1}^{n_1} Q_i z_{Q_i} R_{Q_i},$$

где $(N_c R_c)$ — сила, перпендикулярная поперечному сечению кольца; $R_{P_i}$, $R_{Q_i}$, $R_{p_i}$, $R_{M_i}$ — радиусы приложения усилий; $(M_c R_c)$ — изгибающий момент относительно оси $x$; $z_{p_i}$, $z_{Q_i}$ — координаты точек приложения сил $p_i a_i$ и $Q_i$; $b_i$ — плечо действия сил $P_i$ (остальные обозначения см. в табл. П 3.14).

За положительные направления приняты поперечные силы $Q_1$ и давление $p$, направленные от оси кольца, моменты от усилий, вызывающие поворот сечения по часовой стрелке.

В табл. П 3.15 приведены формулы для перемещений и напряжений при произвольном распределении температур $T(x, z)$ в поперечном сечении кольца, когда модуль упругости и коэффициент линейного расширения в сечении кольца являются переменными: $E(x, z)$, $\alpha(x, z)$.

### 2.5. СОСТАВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В табл. П 3.16 приведены примеры составных конструкций, состоящих из двух элементов и нагруженных равномерным

внутренним давлением. В качестве элементов конструкции рассматриваются тонкостенные оболочки, пластины и кольца.

Формулы для определения усилий и напряжений приведены для стыка рассматриваемых элементов. Чтобы найти усилия и напряжения в произвольном сечении элемента, следует использовать соответствующие выражения для данного элемента, суммируя алгебраически их значения от нагружения внутренним давлением и краевыми силами $H_0$ и моментами $M_0$, полученными для данной составной конструкции, причем для сферического сегмента в качестве $H_0$ следует принимать разность $(H_0 - H)$, учитывающую наличие распорной силы. Формулы приведены при условии, что модули упругости материалов сопрягаемых элементов конструкции одинаковы.

## 3. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Расчет напряжений и перемещений в полом цилиндре от равномерного давления и температурных перепадов в сечениях, удаленных от краев на расстояние $l \geqslant 2{,}5\sqrt{a(b-a)}$, приведен в табл. П 3.17, П 3.18.

3.2. Формулы для расчета перемещений и напряжений в полом цилиндре из однородного материала даны в табл. П 3.17.

3.3. Формулы для расчета перемещений и напряжений в двухслойном цилиндре представлены в табл. П 3.18. Эти формулы учитывают совместность работы слоев цилиндра в осевом и радиальном направлениях (отсутствует проскальзывание слоев и возможность образования зазоров между слоями).

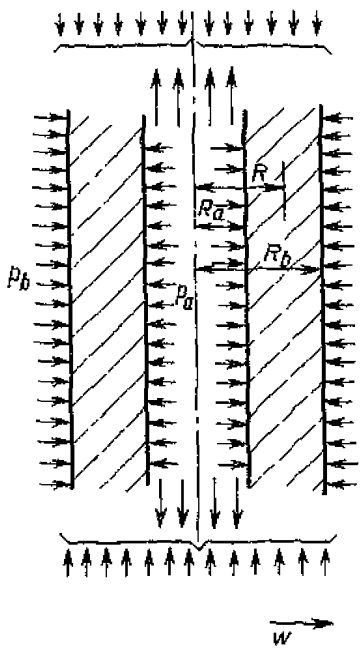
## 4. РАСЧЕТ МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

В зоне резкого изменения геометрии (отверстия, галтели, выточки и т. п.) имеет место локальное возрастание напряжений. При упругих деформациях максимальные напряжения $\sigma_{max}$ в этой области определяют как произведение номинального напряжения $\sigma_{ном}$ на так называемый теоретический коэффициент концентрации $\alpha_\sigma$:

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma \sigma_{ном}.$$

Приведенные в этом разделе коэффициенты концентрации $\alpha_\sigma$ получены из эксперимента или расчета. На каждом рисунке или в таблице указаны номинальные напряжения, по отношению к которым определены коэффициенты концентрации.

Таблица П3.17. **Формулы для перемещений и напряжений в цилиндре из однородного материала**

| Расчетная схема | Радиус | Перемещение | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Давление   | Произвольный | $w=\frac{R}{E}\left[-(1+\mu)\frac{R_a^2R_b^2(-p_a+p_b)}{(R_b^2-R_a^2)R^2}+\right.$ $\left.+(1-2\mu)\frac{p_aR_a^2-p_bR_b^2}{R_b^2-R_a^2}\right]$ | $\sigma_r=\frac{R_a^2R_b^2(p_b-p_a)}{R_b^2-R_a^2}\cdot\frac{1}{R^2}+$ $+\frac{p_aa^2-p_bb^2}{R_b^2-R_a^2}$; $\sigma_\theta=-\frac{R_a^2R_b^2(p_b-p_a)}{R_b^2-R_a^2}\cdot\frac{1}{R^2}+$ $+\frac{p_aR_a^2+p_bR_b^2}{R_b^2-R_a^2}$; $\sigma_z=\frac{p_aR_a^2-p_bR_b^2}{R_b^2-R_a^2}$; | — |
| | $R=R_a$ | $w=\frac{R_a}{E}\left[-(1+\mu)\frac{R_b^2(p_b-p_a)}{R_b^2-R_a^2}+\right.$ $\left.+(1-2\mu)\frac{p_aR_a^2-p_bR_b^2}{R_b^2-R_a^2}\right]$ | $\sigma_r=-p_a$; $\sigma_\theta=-\frac{2p_bR_b^2-p_a(R_a^2+R_b^2)}{R_b^2-R_a^2}$; $\sigma_z=\frac{p_aR_a^2-p_bR_b^2}{R_b^2-R_a^2}$ | — |
| | $R=R_b$ | $w=\frac{R_b}{E}\left[-(1+\mu)\frac{R_a^2(-p_a+p_b)}{R_b^2-R_a^2}+\right.$ $\left.+(1-2\mu)\frac{p_aR_a^2-p_bR_b^2}{R_b^2-R_a^2}\right]$ | $\sigma_r=-p_b$; $\sigma_\theta=\frac{2p_aR_a^2-p_b(R_b^2+R_a^2)}{R_b^2-R_a^2}$ | — |

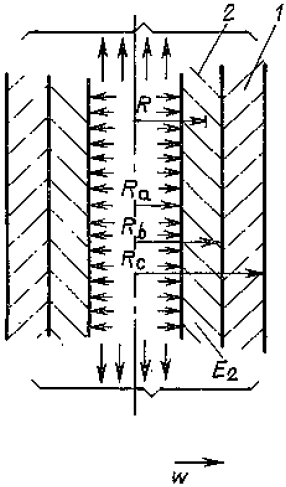
*Продолжение табл. 3.17*

| Расчетная схема | Радиус | Перемещение | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Температурные нагрузки $T=T(R)$ | Произвольный | $w=\frac{\alpha}{R(1-\mu)}\left[(1+\mu)\int\limits_{R_a}^{R} TRdR+\right.$ $\left.+\frac{(1-3\mu)R^2+R_a^2(1+\mu)}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} TRdR\right]$ | $\sigma_r=\frac{\alpha E}{R^2(1-\mu)}\left[\frac{R^2-R_a^2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} TRdR-\right.$ $\left.-\int\limits_{R_a}^{R} TRdR;\right.$ $\sigma_\theta=\frac{\alpha E}{R^2(1-\mu)}\left[\frac{R^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} TRdR+\right.$ $\left.+\int\limits_{a}^{R} TRdR-TR^2\right];$ $\sigma_z=\frac{\alpha E}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} TRdR-T\right]$ | — |
| | $R=R_a$ | $w=\frac{2\alpha R_a}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} TRdR$ | $\sigma_r=0;$ $\sigma_\theta=\frac{\alpha E}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} TRdR-T(R_a)\right];$ | — |

*Продолжение табл. П3.17*

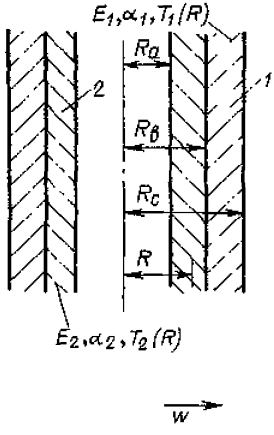
| Расчетная схема | Радиус | Перемещение | Напряжение | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| | | | $\sigma_z=\frac{\alpha E}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_b^2-R_a^2}\int_{R_a}^{R_b} TRdR-T(R_n)\right]$ | |
| | $R=R_b$ | $w=\frac{2\alpha R_b}{R_b^2-R_a^2}\int_{R_n}^{R_b} TRdR$ | $\sigma_r=0;$<br>$\sigma_\theta=\frac{\alpha E}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_b^2-R_a^2}\int_{R_a}^{R_b} TRdR-T(R_b)\right];$<br>$\sigma_z=\frac{\alpha E}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_b^2-R_a^2}\int_{R_a}^{R_b} TRdR-T(R_b)\right]$ | — |

Таблица П3.18. **Формулы для перемещений**

| Расчетная схема | Радиус | Перемещение |
|---|---|---|
| Внутреннее давление   | Произвольный | Слой<br>$w=\frac{R}{E_1}\left[\frac{qR_b^2}{R_c^2-R_b^2}\left(1+\frac{R_c^2}{R^2}\right)-\right.$<br>$\left.-\frac{\mu p(R_b^2-R_a^2)}{R_c^2-R_a^2}+\mu\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}\right]$ |
| | $R=R_b$ | $w=\frac{R_b}{E_1}\left[q\frac{R_b^2+R_c^2}{R_c^2-R_b^2}-\mu\frac{p(R_b^2-R_a^2)}{R_c^2-R_a^2}+\right.$<br>$\left.+\mu\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}\right]$ |
| | $R=R_c$ | $w=\frac{R_c}{E_1}\left[\frac{2qR_b^2}{R_c^2-R_b^2}-\mu\frac{p(R_b^2-R_a^2)}{R_c^2-R_a^2}+\right.$<br>$\left.+\mu\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}\right]$ |
| | Произвольный | Слой<br>$w=\frac{R}{E_2}\left[\frac{pR_a^2}{R_b^2-R_a^2}\left(1+\frac{R_b^2}{R^2}\right)-\right.$<br>$-q\frac{R_b^2}{R_b^2-R_a^2}\left(1+\frac{R_a^2}{R^2}\right)-$<br>$\left.-\mu\frac{p(R_b^2-R_a^2)}{R_c^2-R_a^2}-\frac{\mu Q}{R_b^2-R_a^2}\right]$ |
| | $R=R_b$ | $w=\frac{R_b^2}{E_2}\left[\frac{2pR_a^2}{R_b^2-a^2}-q\frac{R_b^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2}-\right.$<br>$\left.-\mu\frac{p(R_b^2-R_a^2)}{R_c^2-R_a^2}-\frac{\mu Q}{R_b^2-R_a^2}\right]$ |
| | $R=R_a$ | $w=\frac{R_a}{E_2}\left[\frac{p(R_b^2+R_a^2)}{R_b^2-R_a^2}-q\frac{2R_b^2}{R_b^2-R_a^2}-\right.$<br>$\left.-\mu\frac{p(R_b^2-R_a^2)}{R_c^2-R_a^2}-\mu\frac{Q}{R_b^2-R_a^2}\right]$ |

**я напряжений в двухслойном цилиндре**

| Напряжение | Примечание |
|---|---|
| 1<br>$\sigma_\theta=\frac{qR_b^2}{R_c^2-R_b^2}\left(1+\frac{R_c^2}{R^2}\right);$<br>$\sigma_z=\frac{pR_a^2}{R_c^2-R_a^2}-\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}$ | $q=\frac{2R_a^2p}{\frac{E_2(R_b^2-R_a^2)}{1}\left(\frac{R_b^2+R_c^2}{R_c^2-R_b^2}+\nu_1\right)+\frac{1}{E_2}\left(\frac{R_b^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2}-\nu_2\right)};$<br>$Q=p\frac{\left(\frac{1}{E_1}-\frac{1}{E_2}\right)\frac{R_b^2-R_a^2}{R_c^2-R_a^2}}{\frac{1}{E_1(R_c^2-R_b^2)}+\frac{1}{E_2(R_b^2-R_a^2)}}$ |
| $\sigma_\theta=q\frac{R_b^2+R_c^2}{R_c^2-R_b^2};$<br>$\sigma_z=\frac{pR_a^2}{R_c^2-R_a^2}-\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}$ | — |
| $\sigma_\theta=\frac{2qR_b^2}{R_c^2-R_b^2};$<br>$\sigma_z=\frac{pR_a^2}{R_c^2-R_a^2}-\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}$ | — |
| 2<br>$\sigma_\theta=\frac{pR_a^2}{R_b^2-R_a^2}\left[1+\frac{R_b^2}{R^2}\right]-q\frac{R_b^2}{R_b^2-R_a^2}\left[1+\frac{R_a^2}{R^2}\right];$<br>$\sigma_z=\frac{pR_a^2}{R_c^2-R_a^2}+\frac{Q}{R_b^2-R_a^2}$ | |
| $\sigma_\theta=\frac{2pR_a^2}{R_b^2-R_a^2}-q\frac{R_b^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2};$<br>$\sigma_z=\frac{pR_a^2}{R_c^2-R_a^2}+\frac{Q}{R_b^2-R_a^2}$ | — |
| $\sigma_\theta=\frac{p(R_b^2+R_a^2)}{R_b^2-R_a^2}-q\frac{2R_b^2}{R_b^2-R_a^2};$<br>$\sigma_z=\frac{pR_a^2}{R_c^2-R_a^2}+\frac{Q}{R_b^2-R_a^2}$ | — |

| Расчетная схема | Радиус | Перемещение |
|---|---|---|
| Температурные нагрузки | Произвольный | **Слой** |
|   | | $w=\frac{\alpha_1}{R(1-\mu)}\left[(1+\mu)\int_{R_b}^{R}T_1(R)\,RdR+\right.$ $+\frac{(1-3\mu)R^2+R_b^2(1+\mu)}{R_c^2-R_b^2}\int_{b}^{c}T_1(R)\times$ $\left.\times RdR\right]+\frac{R}{E_1}\left[\frac{qR_b^2}{R_c^2-R_b^2}\left(1+\frac{R_c^2}{R^2}\right)+\right.$ $\left.+\mu\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}\right]$ |
| | $R=R_b$ | $w=\frac{R_b\alpha_1}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR+$ $+\frac{R_b}{E_1}\left[q\frac{R_b^2+R_c^2}{R_c^2-R_b^2}+\mu\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}\right]$ |
| | $R=R_c$ | $w=\frac{2R_c\alpha_1}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR+$ $+\frac{R_c}{E_1}\left[\frac{2qR_b^2}{R_c^2-R_b^2}+\mu\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}\right]$ |

| Напряжение | Примечание |
|---|---|
| **1** | |
| $\sigma_\theta=\frac{\alpha_1 E_1}{(1-\mu)R^2}\left[\frac{R^2+R_b^2}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR+\int_{R_b}^{R}T_1(R)\,RdR-T_1(R)\,R^2\right]+\frac{qR_b^2}{R_c^2-R_b^2}\left(1+\frac{R_c^2}{R^2}\right);$ $\sigma_z=\frac{\alpha_1 E_1}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_c^2-R_b^2}\times\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR-T_1(R)\right]-\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}$ | $q=\frac{-\frac{2\alpha_1}{c^2-b^2}\int_b^c T_1(R)\,RdR+\frac{2\alpha_2}{b^2-a^2}\int_a^b T_2(R)\,RdR}{\frac{c^2+(1-2\mu)b^2}{E_1(c^2-b^2)}+\frac{a^2+(1-2\mu)b^2}{E_2(b^2-a^2)}}$ $Q=q\left\{2b^2\mu+\frac{\frac{c^2+(1-2\mu)b^2}{E_1(c^2-b^2)}+\frac{a^2+(1-2\mu)b^2}{E_2(b^2-a^2)}}{\frac{1}{E_1(c^2-b^2)}+\frac{1}{E_2(b^2-a^2)}}\right\}$ |
| $\sigma_\theta=\frac{\alpha_1 E_1}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR-T_1(R_b)\right]+q\frac{R_b^2+R_c^2}{R_c^2-R_b^2};$ $\sigma_z=\frac{\alpha_1 E_1}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR-T_1(R_b)\right]-\frac{Q}{R_c^2-R_b^2}$ | — |
| $\sigma_\theta=\frac{\alpha_1 E_1}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR-T_1(R_c)\right]+\frac{2qR_b^2}{R_c^2+R_b^2};$ $\sigma_z=\frac{\alpha_1 E_1}{1-\mu}\left[\frac{2}{R_c^2-R_b^2}\int_{R_b}^{R_c}T_1(R)\,RdR-\right.$ | — |

| Расчетная схема | Радиус | Перемещение |
|---|---|---|
| | | |
| | Произвольный | **Слой**<br>$w=\frac{\alpha_2}{R(1-\mu)}\left[(1+\mu)\int\limits_{R_a}^{R} T_2(R)RdR+\right.$<br>$+\frac{(1-3\mu)R^2+R_a^2(1+\mu)}{R_b^2-R_a^2}\times$<br>$\left.\times\int\limits_{R_a}^{R_b} T_2(R)RdR\right]+\frac{R}{E_2}\left[-\frac{qR_b^2}{R_b^2-R_a^2}\times\right.$<br>$\left.\times\left(1+\frac{R_a^2}{R^2}\right)-\frac{\mu Q}{R_b^2-R_a^2}\right]$ |
| | $R=R_b$ | $w=\frac{2R_b\alpha_2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} T_2(R)RdR+$<br>$+\frac{R_b}{E_2}\left[-q\frac{R_b^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2}-\mu\frac{Q}{R_b^2-R_a^2}\right]$ |
| | $R=R_a$ | $w=\frac{2R_a\alpha_2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b} T_2(R)RdR+$<br>$5+\frac{R_a}{E_2}\left[-q\frac{2R_b^2}{R_b^2-R_a^2}-\mu\frac{Q}{R_b^2-R_a^2}\right]$ |

| Напряжение | Примечание |
|---|---|
| $-T_1(R_c)\Big]-\dfrac{Q}{R_c^2-R_b^2}$ | |
| **2**<br>$\sigma_\theta=\dfrac{\alpha_2 E_2}{(1-\mu)R^2}\Big[\dfrac{R^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b}T_2(R)RdR+$<br>$+\int\limits_{R_a}^{R}T_2(R)RdR-T_2(R)R^2\Big]-$<br>$-q\dfrac{R_b^2}{R_b^2-R_a^2}\left(1+\dfrac{R_a^2}{R^2}\right);$<br>$\sigma_z=\dfrac{\alpha_2 E_2}{1-\mu}\Big[\dfrac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{Rb}T_2(R)RdR-$<br>$-T_2(R)\Big]+\dfrac{Q}{R_b^2-R_a^2}$ | — |
| $\sigma_\theta=\dfrac{\alpha_2 E_2}{1-\mu}\Big[\dfrac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b}T_2(R)RdR-$<br>$-T_2(R_b)\Big]-q\dfrac{R_b^2+R_a^2}{R_b^2-R_a^2};$<br>$\sigma_z=\dfrac{\alpha_2 E_2}{1-\mu}\Big[\dfrac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b}T_2(R)RdR-$<br>$-T_2(R_a)\Big]+\dfrac{Q}{R_b^2-R_a^2}$ | — |
| $\sigma_\theta=\dfrac{\alpha_2 E_2}{1-\mu}\Big[\dfrac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_b}T_2(R)RdR-$<br>$-T_2(R_a)\Big]-q\dfrac{2R_b}{R_b^2-R_a^2};$<br>$\sigma_z=\dfrac{\alpha_2 E_2}{1-\mu}\Big[\dfrac{2}{R_b^2-R_a^2}\int\limits_{R_a}^{R_a}T_2(R)RdR-$<br>$-T_2(R_a)\Big]+\dfrac{Q}{R_b^2-R_a^2}$ | — |

Данный раздел содержит формулы и графики для определения коэффициентов $\alpha_\sigma$ при упругих деформациях от действия силовых нагрузок, взятые из известных опубликованных работ. Они представлены для следующих типов концентраторов:

одиночные отверстия в пластинках (рис. П 3.2—П 3.10);

группа круговых отверстий в пластинках (рис. П 3.11—П 3.16);

подкрепленные отверстия и патрубки (рис. П 3.17—П 3.26);

зоны сопряжения элементов конструкций (рис. П 3.27—П 3.33);

поверхностные и подповерхностные дефекты (рис. П 3.34—П 3.37);

некоторые типы сварных соединений (рис. П 3.38).

На приведенных в разделе рисунках приняты следующие условные обозначения:

$R$ — радиус галтели, отверстия, мм

$D$ — диаметр отверстия, цилиндра, мм

$H$ — толщина пластины, оболочки, мм

$S$ — ширина пластины, перемычки между отверстиями, мм

$L$ — межцентровое расстояние, расстояние отверстия от края пластины, мм

$P$ — растягивающее усилие, Н (кгс)

$M$ — изгибающий момент, Н·м (кгс·м)

$p$ — внутреннее давление, Па (кгс/мм$^2$)

$A$, $Б$, $B$ — наиболее опасные точки

$\nu$ — коэффициент Пуассона

$\beta$ — угол между направлением действия силы и линией центров отверстий, рад

$\gamma$ — угол наклона галтели, рад

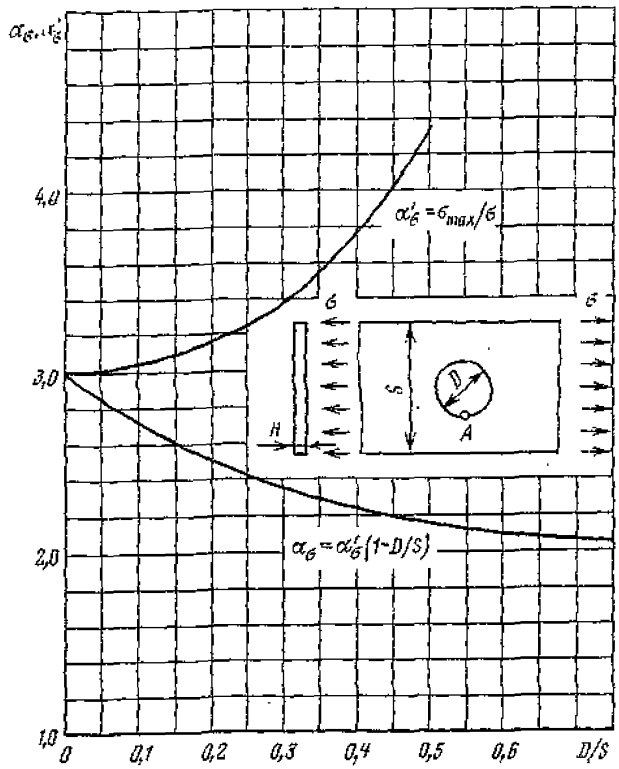



Рис. П3.2. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ и $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины конечной ширины с центрально расположенным круговым отверстием

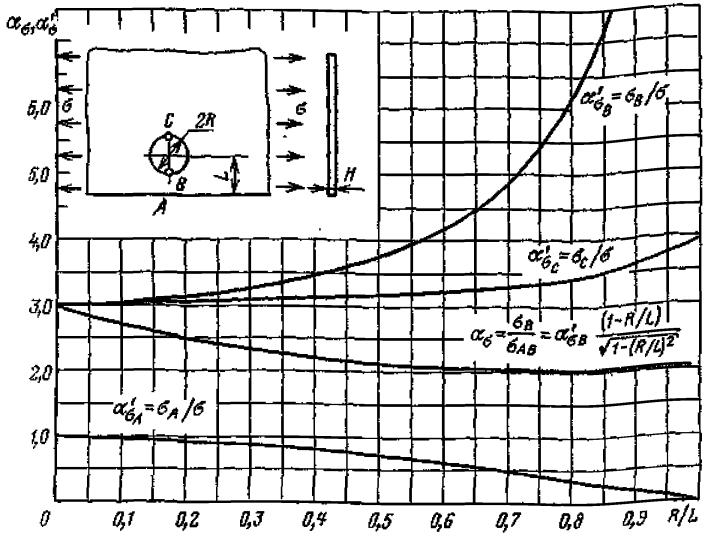



Рис. П3.3. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для точки $B$ и $\alpha'_\sigma$ для точек $A$, $B$ и $C$ растягиваемо полубесконечной пластины с расположенным у края круговым отверстием

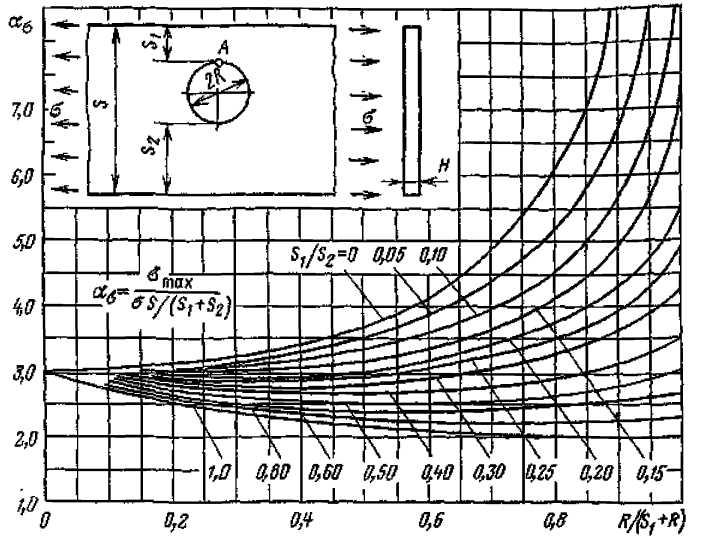



Рис. П3.4. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины конечной ширины с нецентральным круговым отверстием

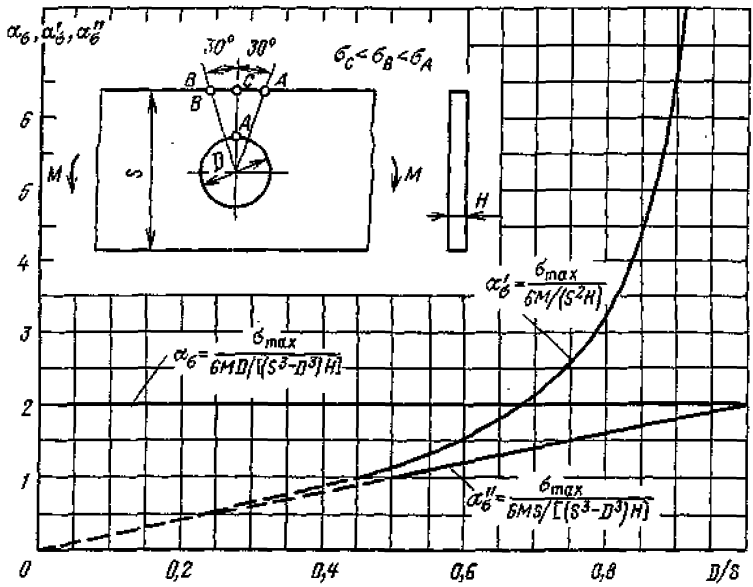



Рис. П3.5. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ ($\sigma_{ном}$ вычислено в точке $A$), $\alpha''_\sigma$ ($\sigma_{ном}$ вычислено в точке $C$) и $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ изгибаемого тонкого бруса с центральным круговым отверстием

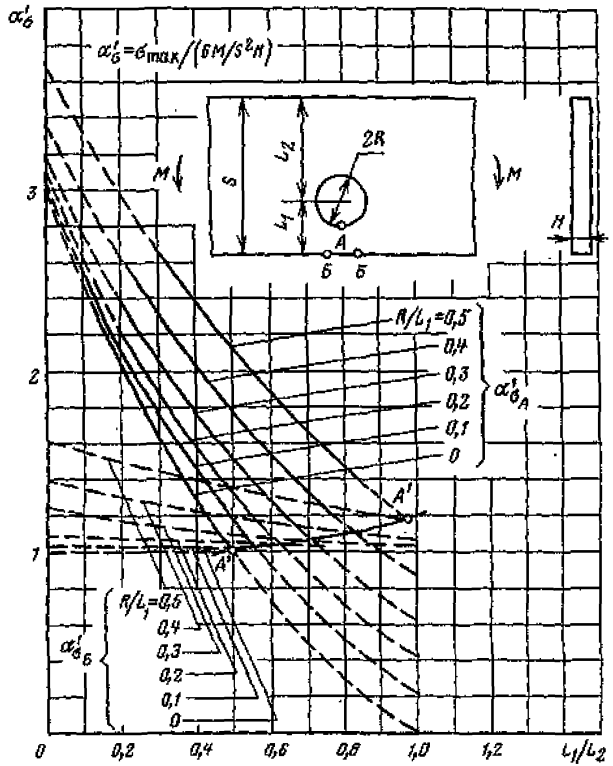



Рис. П3.6. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точек $A$ и $Б$ изгибаемого тонкого бруса с нецентральным круговым отверстием на линии $A'A'$ $(\alpha'_{\sigma_{A'}}=\alpha'_{\sigma_{B}})$

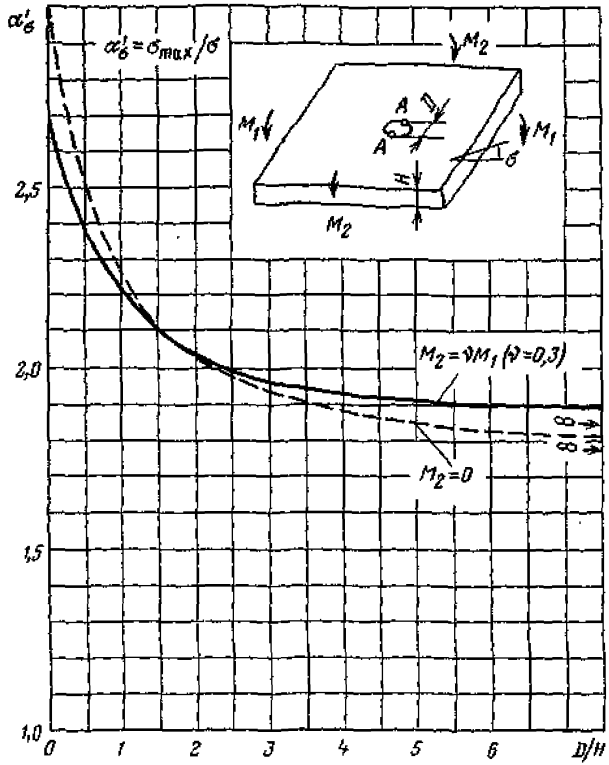



Рис. П3.7. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ неограниченной пластины с круговым отверстием при чистом $(M_2=0)$ и цилиндрическом $(M_2=\nu M_1)$ изгибах

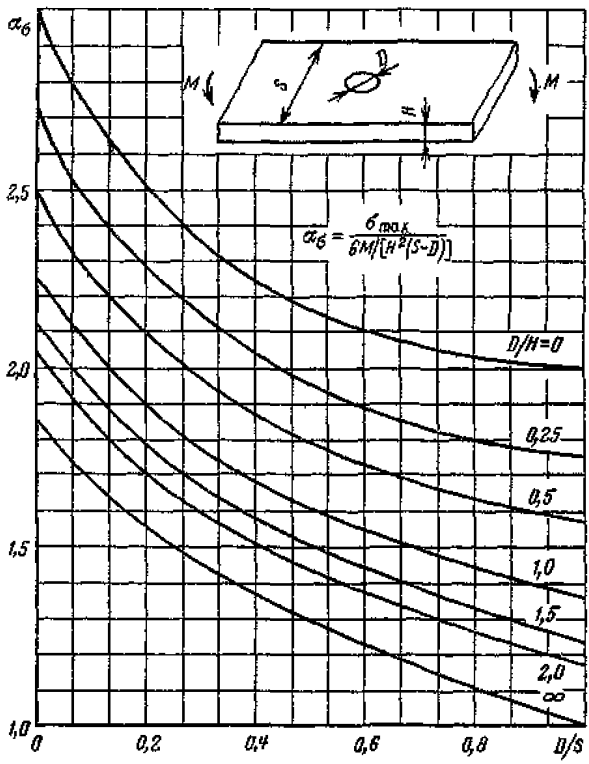



Рис. П3.8. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ при поперечном изгибе пластины конечной ширины с центральным круговым отверстием

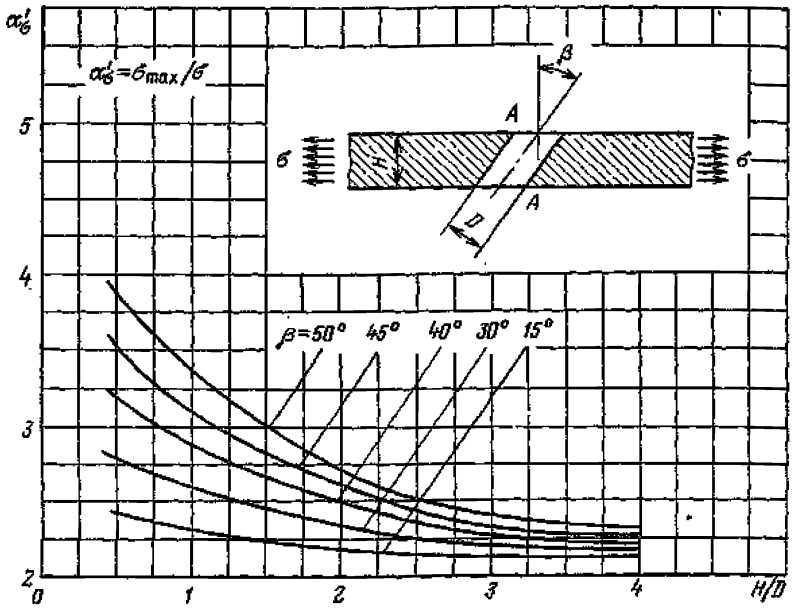



Рис. П3.9. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ неограниченной пластины с косым отверстием при двухосном растяжении

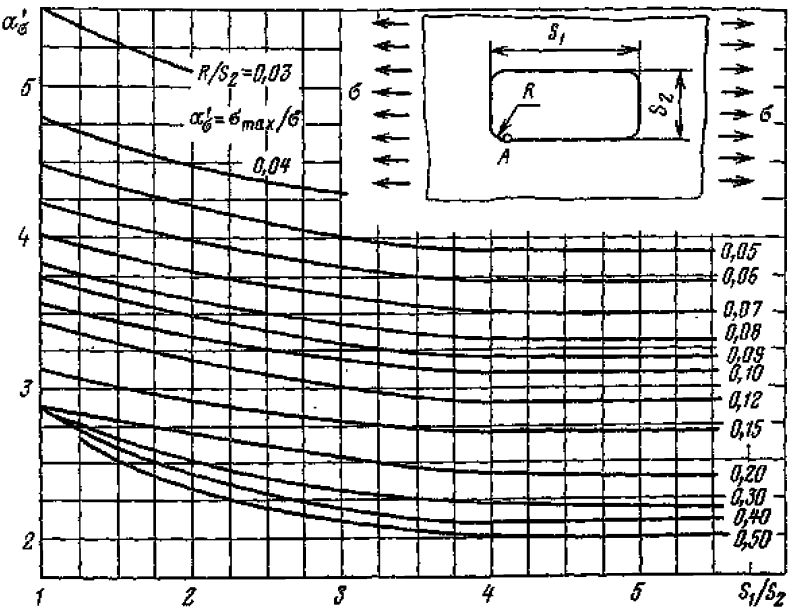



Рис. П3.10. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ неограниченной растягиваемой пластины с прямоугольным отверстием со скругленными углами

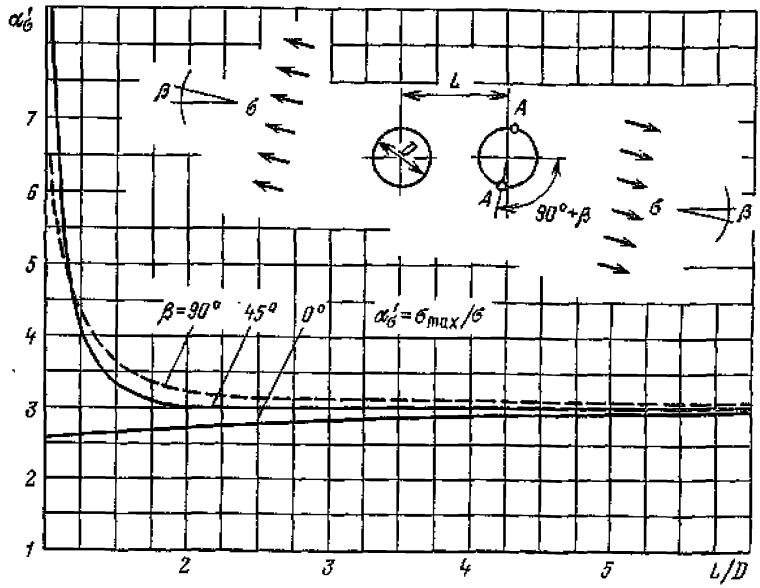



Рис. П3.11. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ бесконечной пластины с двумя равными круговыми отверстиями при растяжении под углом к линии центров отверстий

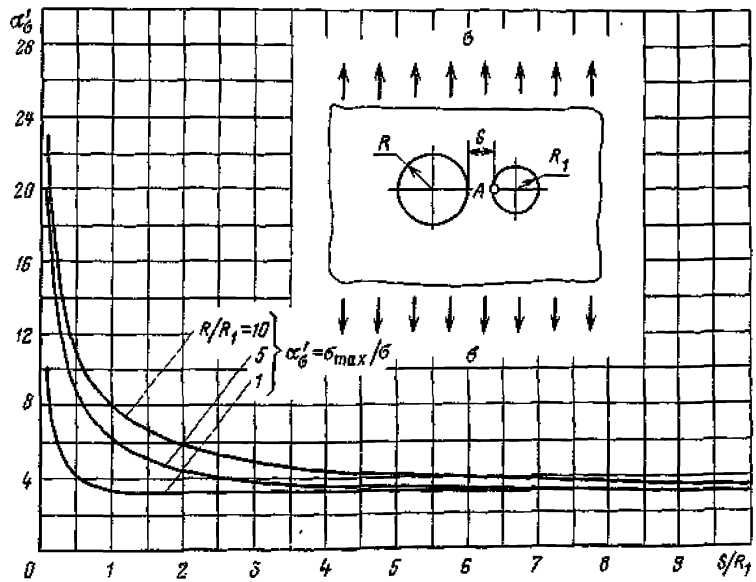



Рис. П3.12. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ бесконечной пластины с двумя неравными круговыми отверстиями при растяжении перпендикулярно линии центров отверстий

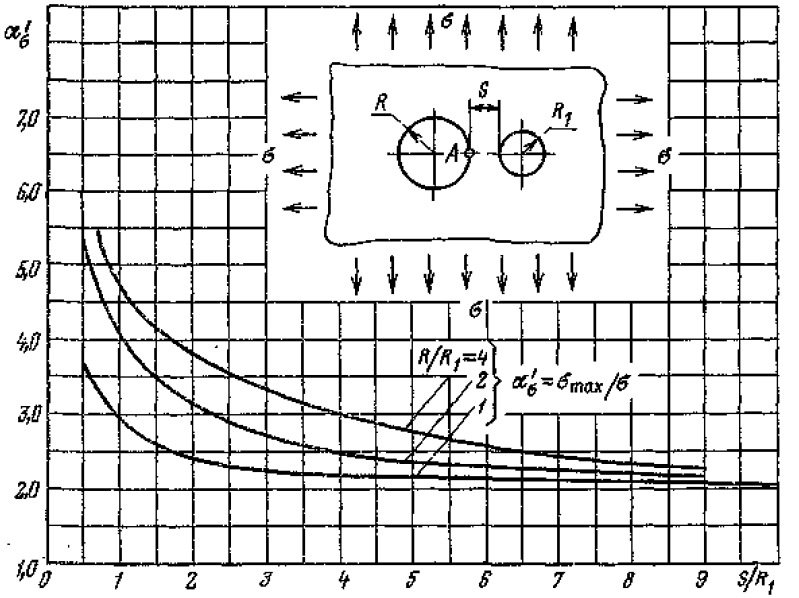



Рис. П3.13. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ бесконечной пластины с неравными круговыми отверстиями при двухосном растяжении

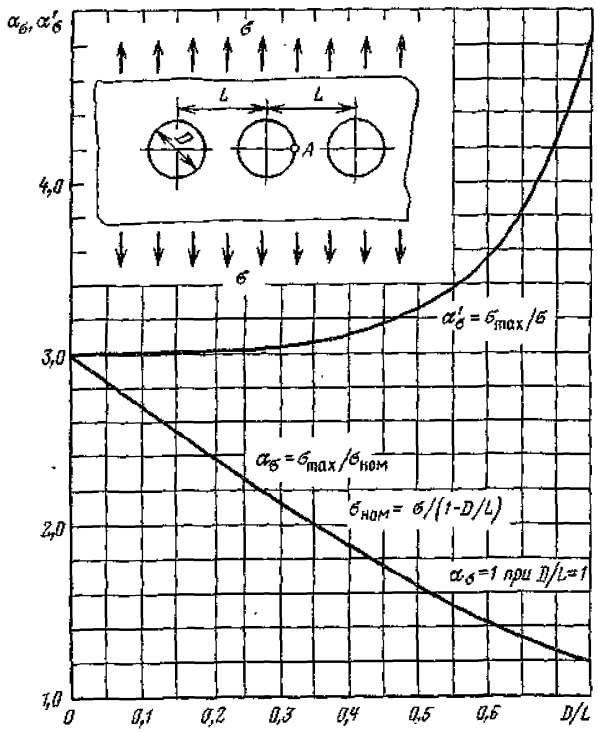



Рис. П3.14. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ и $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ неограниченной пластины с бесконечным рядом круговых отверстий при растяжении перпендикулярно линии центров отверстий

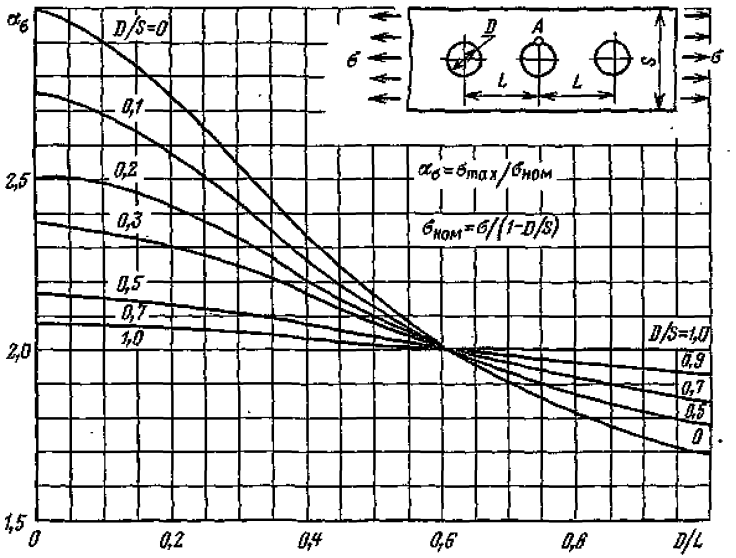



Рис. П3.15. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины конечной ширины с бесконечным рядом круговых отверстий

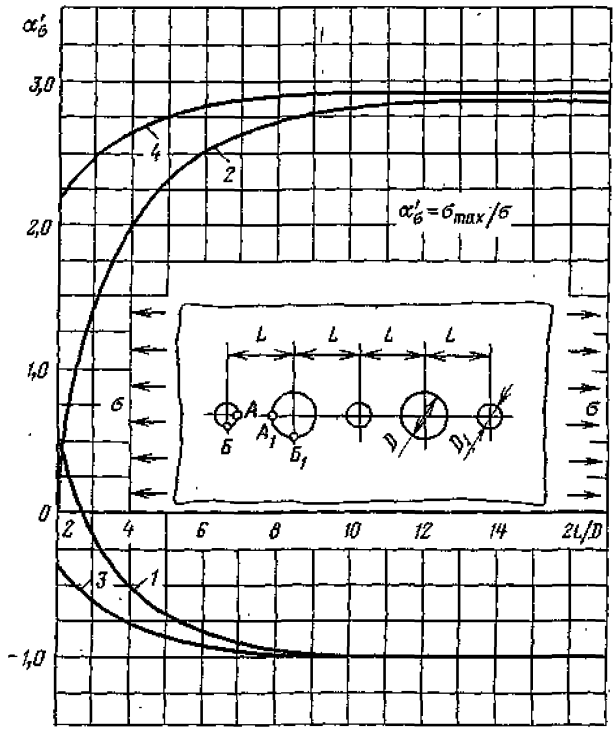



Рис. П3.16. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для растягиваемой пластины с периодически расположенными круговыми отверстиями различных диаметров при $D/D_1 = 4$:
*1* — для точки *А*; *2* — для точки *Б*; *3* — для точки $A_1$; *4* — для точки $Б_1$

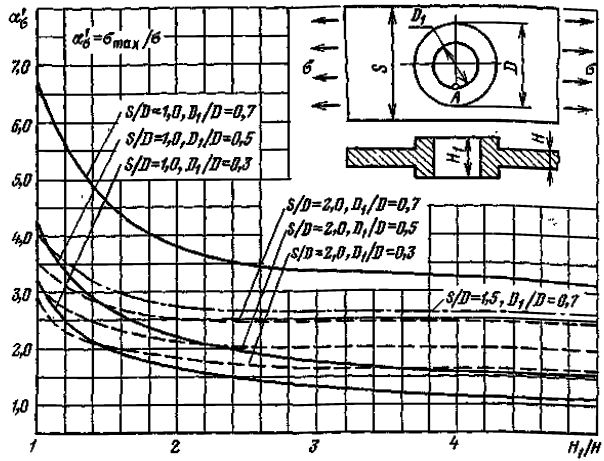



Рис. П3.17. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины с подкрепленным круговым отверстием при $D/H=5$

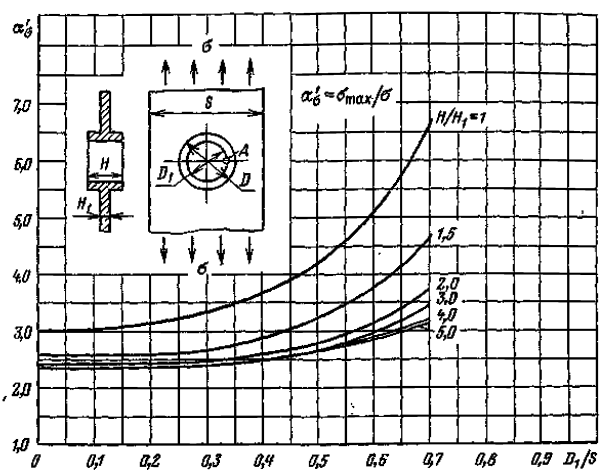



Рис. П3.18. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины с подкрепленным отверстием при $D_1/D=0,7$ и $D/H=5$

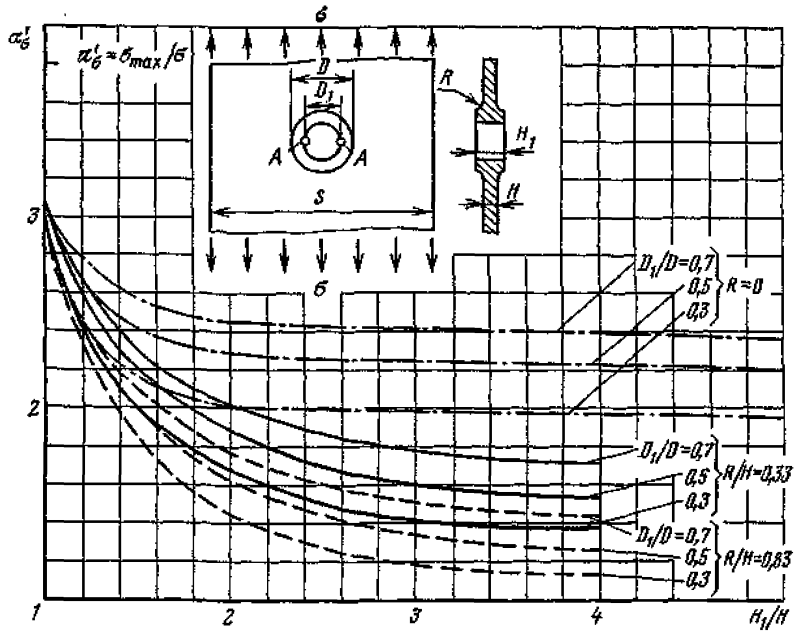



Рис. П3.19. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины с подкрепленным круговым отверстием и галтельным переходом от подкрепления к пластине при $S/D=4$ и $D/H=5$

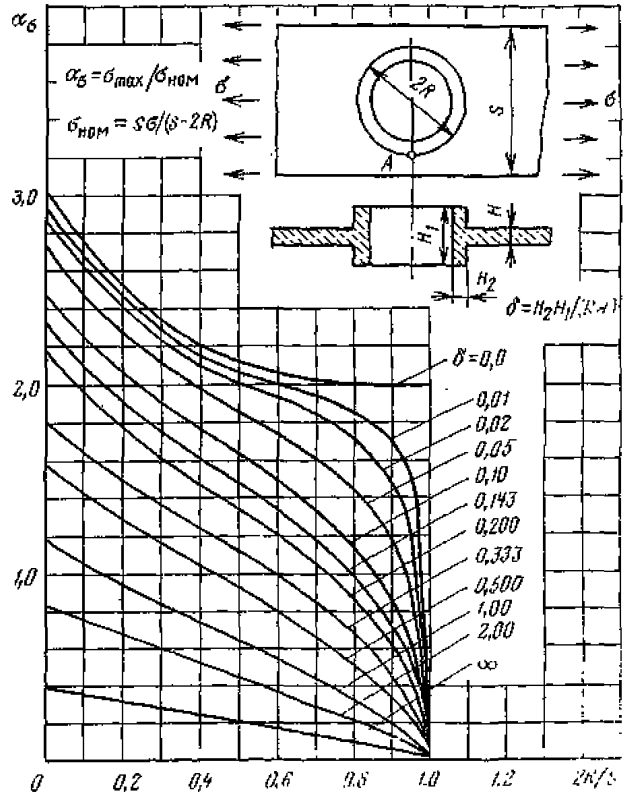



Рис. П3.20. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой пластины конечной ширины с центральным круговым отверстием, подкрепленным тонким кольцом

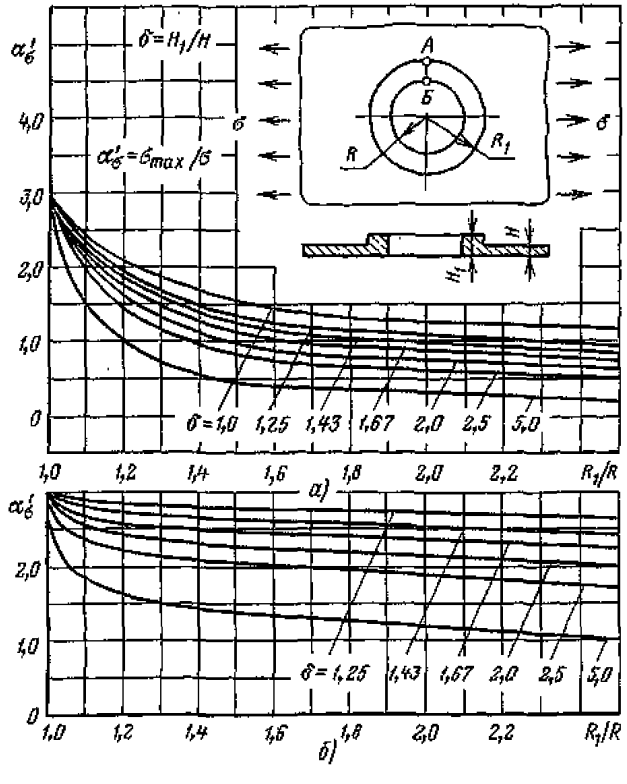



Рис. П3.21. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для растягиваемой неограниченной пластины с односторонним подкреплением отверстия:

*а* — для точки *A* на линии спая; *б* — для точки *Б* на внутренней поверхности отверстия

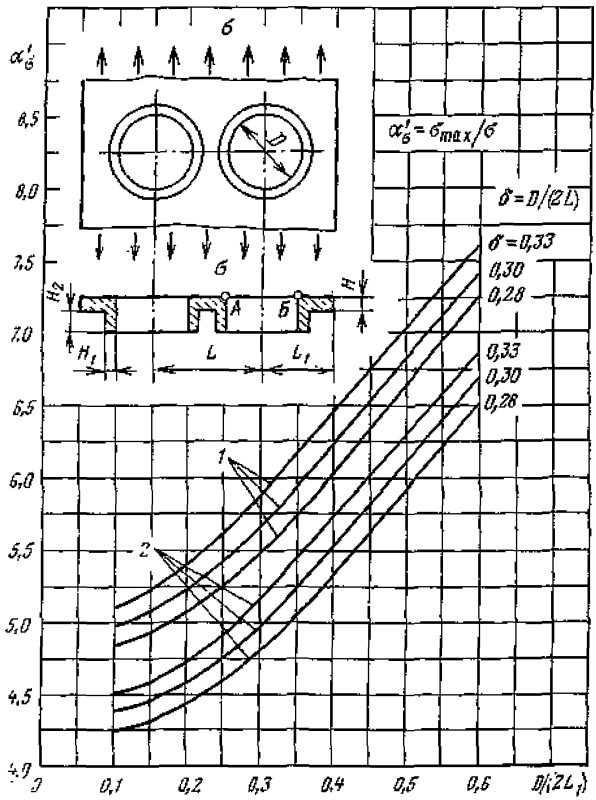



Рис. П3.22. Коэффициенты $\alpha'_\sigma$ для растягиваемой пластины с двумя соседними односторонне подкрепленными отверстиями $(H_1=H,\ H_2=2H)$:
*1—для точки А; 2—для точки Б*

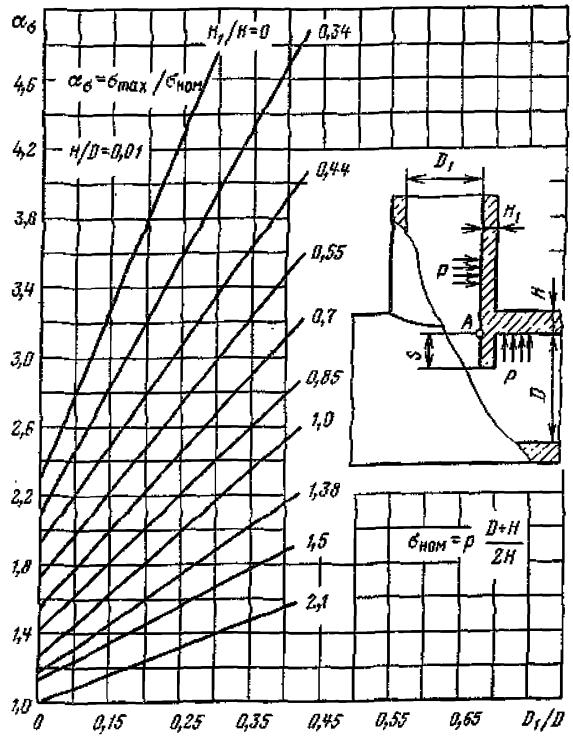



Рис. П3.23. Нагружение внутренним давлением цилиндрического сосуда с пропущенным патрубком ($\alpha_\sigma$ для точки $A$)

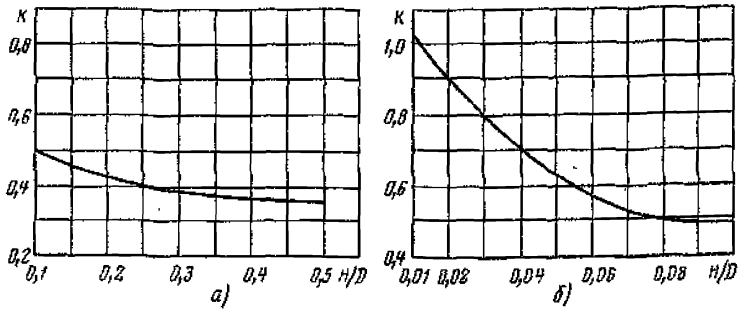



Рис. П3.24. Поправочный коэффициент $K$ для определения $\alpha'_\sigma=K\alpha_\sigma$ в подкрепленных отверстиях сосудов с $H/D\geqslant 0{,}01$ для $\alpha_\sigma$, найденного по рис. П3.23: *а*—для $H/D$ от 0,1 до 0,5; *б*—для $H/D$ от 0,01 до 0,1

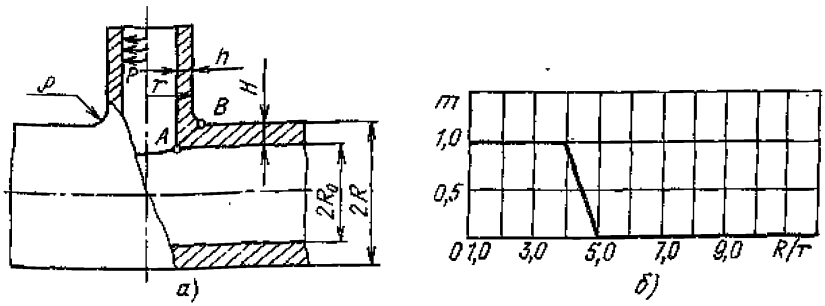



Рис. П3.25. Определение коэффициентов концентрации напряжений в точках $A$ и $B$ тройникового соединения, нагруженного внутренним давлением: *а*—схема тройникового соединения; *б*—график поправочного коэффициента $m$

| Формулы для определения коэффициентов концентрации в точках $A$ и $B$ | Пределы применимости формул | Номинальное напряжение $\sigma_{ном}$ |
|---|---|---|
| $\alpha^A_{\sigma_0}=\left[(0{,}55y_1+4{,}51y_2+0{,}06y_3-3{,}08)^2-(4{,}23y_2+\right.$<br>$\left.+0{,}2y_3-2{,}62)^2-(0{,}42-0{,}07y_3)^2+3{,}7\right]\frac{n}{K}$, где<br>$y_1=\frac{1}{x_1}$; $y_2=x_2+\frac{0{,}001}{x_2}$; $y_3=x_3=\sqrt{h/\rho}$;<br>$K=0{,}65+0{,}35\frac{R}{r}$ при $1{,}0\leqslant\frac{R}{r}\leqslant 3{,}5$; $K=1{,}525+$<br>$+0{,}1\frac{R}{r}$ при $3{,}5\leqslant\frac{R}{r}\leqslant 12{,}0$; $n=1{,}0$ при<br>$0{,}05\leqslant x_2\leqslant 0{,}4$; $n=1{,}0+(0{,}65-13x_2)m$ при<br>$0{,}02\leqslant x_2\leqslant 0{,}05$, где $m$ см. на рис. П3.25, *б*.<br>$\alpha^B_{\sigma_0}=\left[(1{,}36z_1+1{,}2z_2-2{,}23)^2-(0{,}51z_3-\right.$<br>$\left.-0{,}72)^2+(2{,}81z_2-0{,}31z_3-1{,}59)^2+0{,}66\right]\frac{1}{K_1}$,<br>где $K_1=\left(0{,}18\frac{R}{r}+0{,}82\right)\ln\left(6\frac{R}{r}-3{,}28\right)$;<br>$z_1=1/x_1$; $z_2=\sqrt{x_2}$; $z_3=\sqrt{h/\rho}$.<br>$\alpha^B_{\sigma_z}=\alpha^B_{\sigma_0}K_2$, где $K_2=(0{,}076x_3+0{,}652)+$<br>$+\frac{0{,}05-x_2}{15x_2}x_1$ | $x_1=\frac{H}{h}\geqslant 0{,}7$;<br>$0{,}02\leqslant\frac{h}{R}=x_2\leqslant 0{,}4$;<br>$0{,}5\leqslant\sqrt{\frac{h}{\rho}}=x_3\leqslant 3{,}0$;<br>$1{,}0\leqslant\frac{R}{r}\leqslant 12{,}0$;<br>$x_1x_2\leqslant 0{,}7$ | $p\frac{R^2+R_0^2}{R^2-R_0^2}$ |

Для равнопрочных тройников допускается применение формулы

$$\alpha^A_{\sigma_0}=1{,}2\left[2+2\left(\frac{R_0}{R}\right)^2-\left(\frac{R_0}{R}\right)^4\right]$$

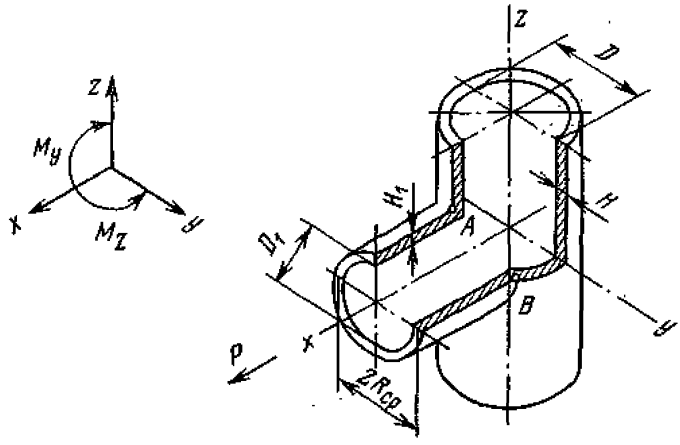



Рис. П3.26. Нагружение патрубка моментами и растягивающей силой (формулы для определения $\alpha_\sigma$ для каждого вида нагрузки приведены ниже)

| Вид нагрузки | Формула для определения $\alpha_\sigma$ | Номинальное напряжение $\sigma_{ном}$ | Точка максимальных напряжений | Предел применимости формулы |
|---|---|---|---|---|
| $M_y$ | $0{,}9+\frac{11{,}1D_1}{D}\left(1-\frac{0{,}3H}{D_1}\right)+\frac{0{,}8H_1}{D_1}$ | $\frac{M_1}{\pi R_{ср}^2 H_1}$ | $A$ | $\frac{D_1}{D}\leqslant 0{,}2$ |
| $M_z$ | $0{,}9+\frac{10{,}4D_1}{D}\left(1-\frac{0{,}3H}{D_1}\right)+\frac{0{,}7H_1}{D_1}$ | $\frac{M_2}{\pi R_{ср}^2 H_1}$ | $B$ | $\frac{H}{D}\leqslant 0{,}2$ |
| $P$ | $0{,}9+\frac{10{,}6D_1}{D}\left(1-\frac{0{,}4H}{D_1}\right)+\frac{4{,}0H_1}{D_1}$ | $\frac{P}{2\pi R_{ср} H_1}$ | $B$ | $\frac{H_1}{D_1}\leqslant 0{,}2$ |

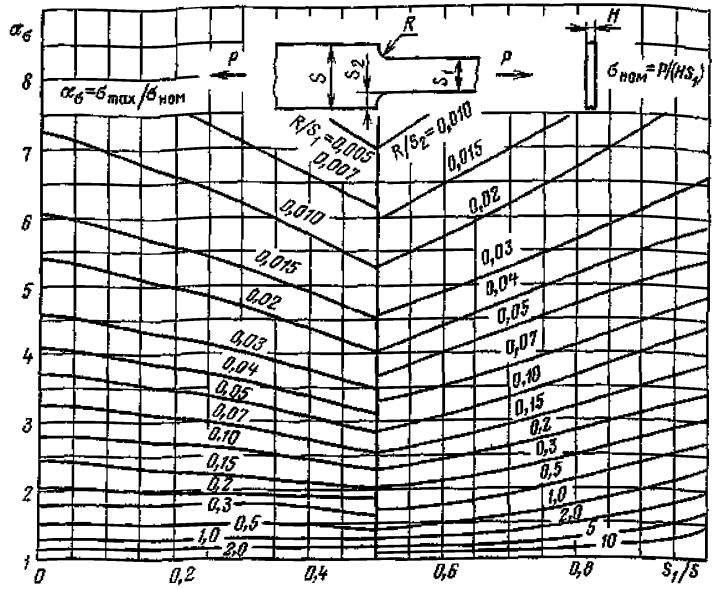



Рис. П3.27. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для растягиваемого плоского ступенчатого стержня с галтельными переходами

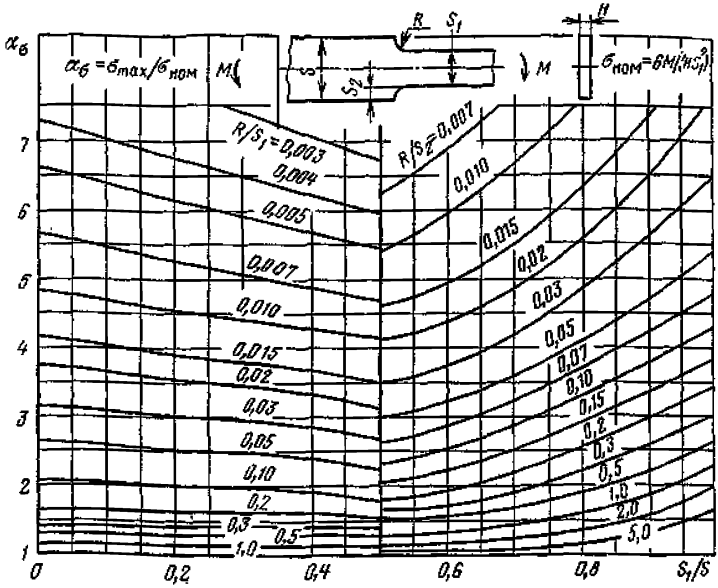



Рис. П3.28. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для изгибаемого плоского ступенчатого бруса с галтельными переходами

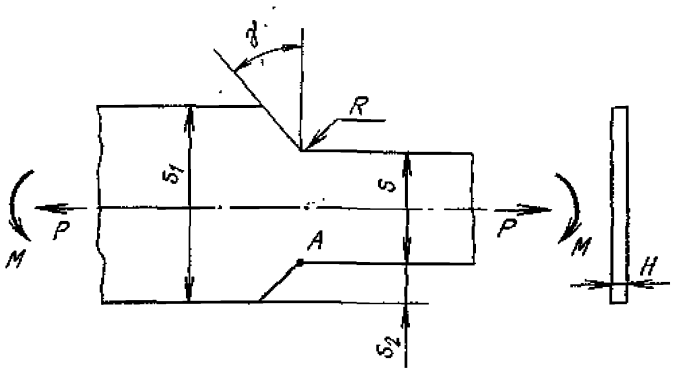



Рис. П3.29. Ступенчатый плоский брус с наклонными галтелями, нагруженный осевой силой и изгибающим моментом. Формулы для определения коэффициентов концентрации для точки $A$ приведены ниже

| Силовой фактор | Номинальное напряжение $\sigma_{ном}$ | Формула для определения $\alpha_\sigma$ | Формула для определения $K$ |
|---|---|---|---|
| $P$ | $\dfrac{P}{HS}$ | $1+K\left[1-\left(\dfrac{\gamma}{90}\right)^{1+2{,}4\sqrt{R/S_2}}\right]$ | $K=\left[\dfrac{1}{2{,}8(S_1/S)-2}\dfrac{S_2}{R}\right]^{0{,}65}$ |
| $M$ | $\dfrac{6M}{HS^2}$ | | $K=\left[\dfrac{1}{5{,}37(S_1/S)-4{,}8}\dfrac{S_2}{R}\right]^{0{,}85}$ |

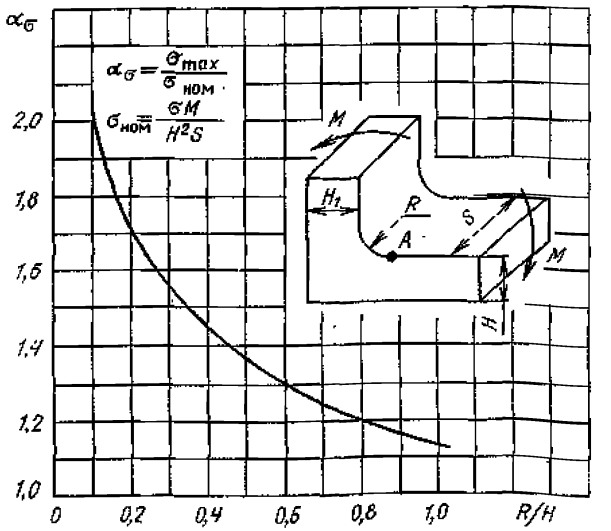
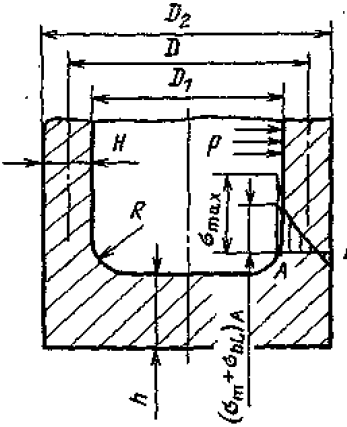



Рис. П3.30. Коэффициент $\alpha_\sigma$ для точки $A$ изгибаемого углового элемента (рекомендуется применять при $H_1/H=1$)




$K_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_{ном}$;

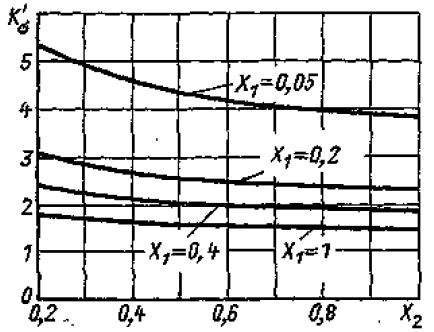
$\sigma_{ном} = p(D_2^2+D_1^2)/(D_2^2-D_1^2)$;

$K_\sigma = [1{,}1+5{,}35(Z-0{,}2)/X_3](1+K)$,

где $Z = X_2/(X_1)^{-0{,}5}$; $K=0$, кроме

$K = 0{,}0014\, X_1^{-3}(0{,}9-X_2^{0{,}4})(X_3^{0{,}1}-1)$ при $X_1<0{,}2$; $X_3>1$

*а)*




$K'_\sigma = \sigma_{max}/(\sigma_m+\sigma_{bL})_A$

$K'_\sigma = 0{,}7\, X_1^{-0{,}5} X_2^{-0{,}25} + 0{,}8$

*б)*

Рис. П3.31. Коэффициенты концентрации напряжений для точки $A$ $K\sigma(a)$ и $K'_\sigma(\delta)$ цилиндрического сосуда с плоским днищем:

$X_1 = R/H$ $\quad 0{,}05 \leqslant X_1 \leqslant 1$

$X_2 = D/(20H)$ $\quad 0{,}2 \leqslant X_2 \leqslant 1$

$X_3 = h/H$ $\quad 1 \leqslant X_3 \leqslant 4$

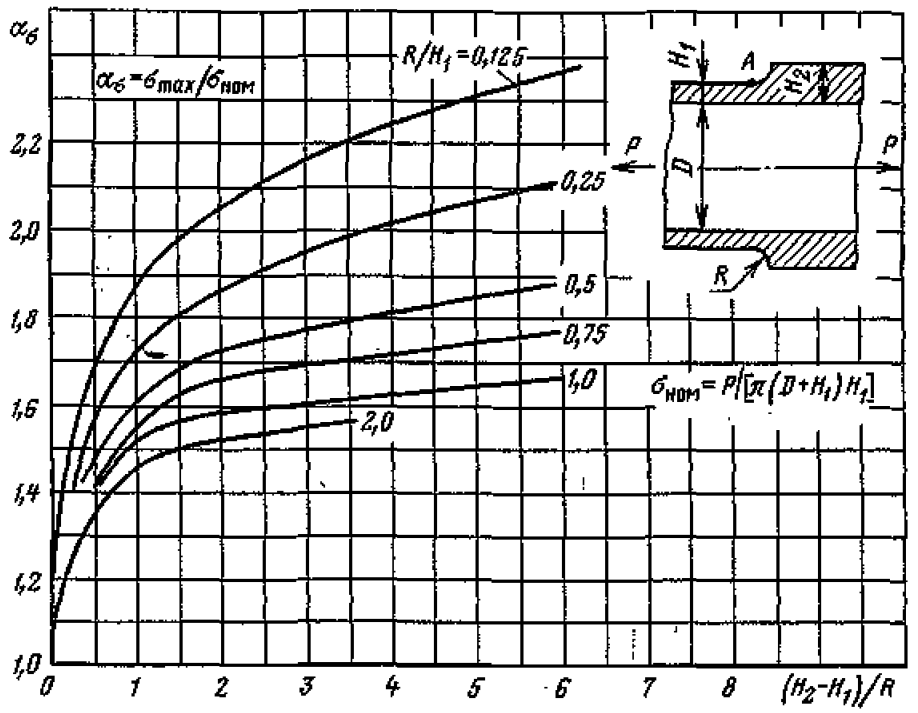



Рис. П3.32. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ для точки $A$ растягиваемой трубы со ступенчатым изменением толщины стенки и галтелями

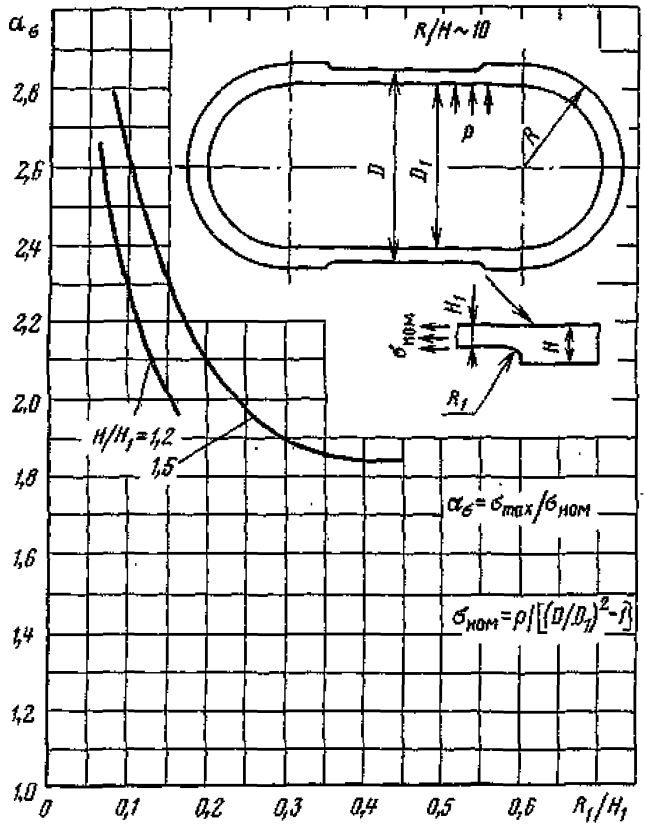



Рис. П3.33. Коэффициент $\alpha_\sigma$ для нагружения внутренним давлением сосуда со ступенчатым изменением толщины стенки и галтелями

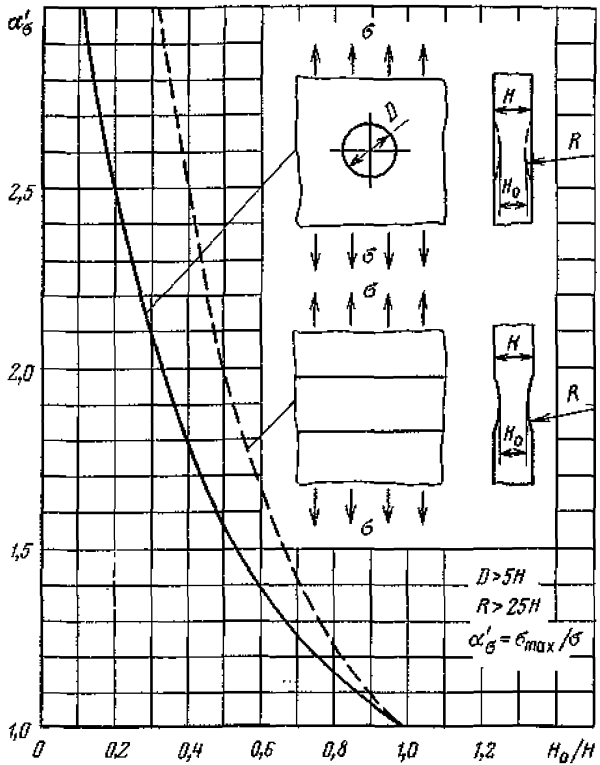



Рис. П3.34. Коэффициент $\alpha'_\sigma$ для растягиваемой неограниченной пластины с мелкими сферическими углублениями на обеих поверхностях

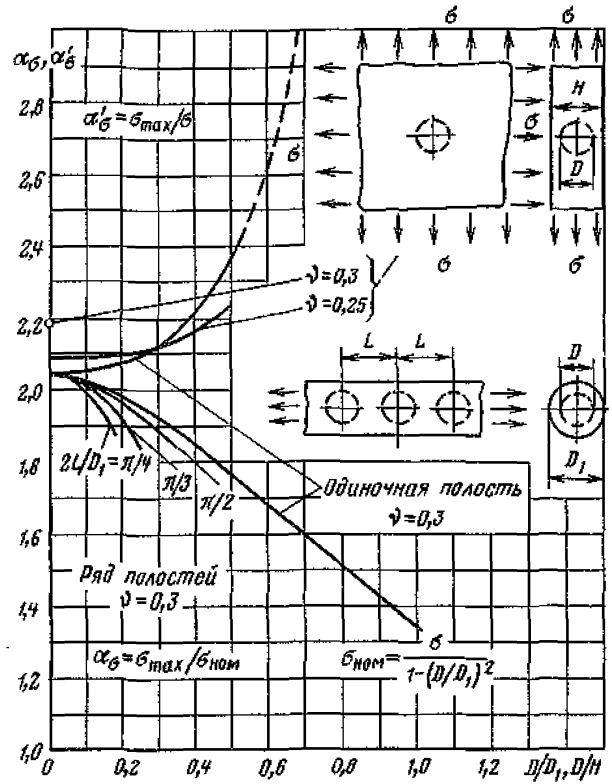



Рис. П3.35. Коэффициенты $\alpha_\sigma$ и $\alpha'_\sigma$ для растягиваемых пластины и цилиндра с центральной сферической полостью

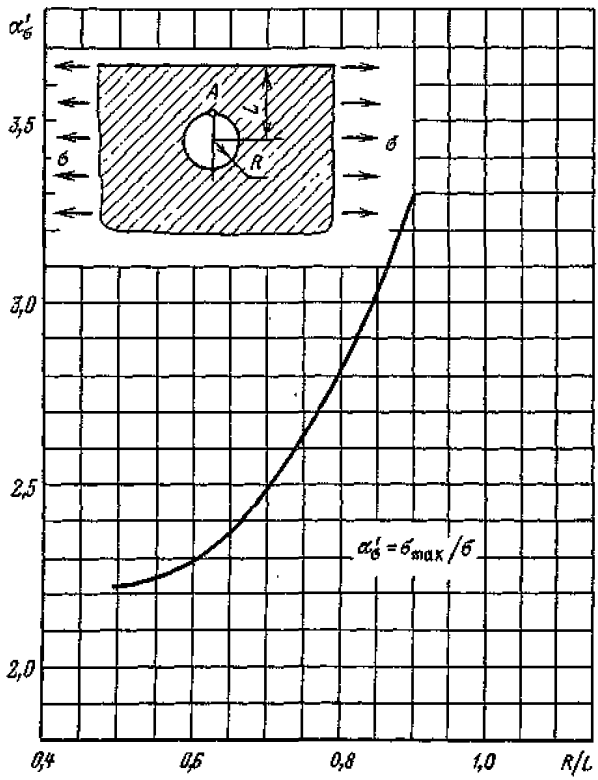



Рис. П3.36. Коэффициент концентрации $\alpha'_\sigma$ для точки $A$ при двухосном растяжении полубесконечного тела со сферической полостью вблизи поверхности ($\nu = 0{,}25$)

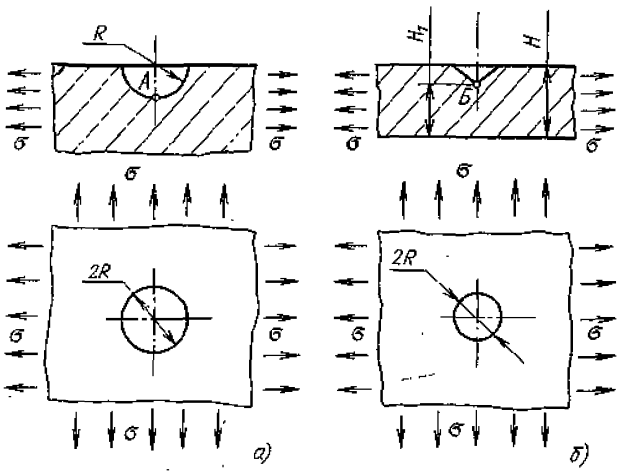



Рис. П3.37. Некоторые типы поверхностных дефектов в растягиваемых элементах:

*а* — полубесконечное тело с полусферическим углублением; *б* — пластина с гиперболическим углублением (значения коэффициентов концентрации $\alpha_\sigma$ для точек *А* и *Б* приведены ниже)

| Случай нагружения | Номинальное напряжение $\sigma_{ном}$ | Значение $\alpha_\sigma$ |
|---|---|---|
| Рис. П3.37, *а* | $\sigma$ | 2.23 ($\nu$=0,25) |
| Рис. П3.37, *б* | | 3,8 |

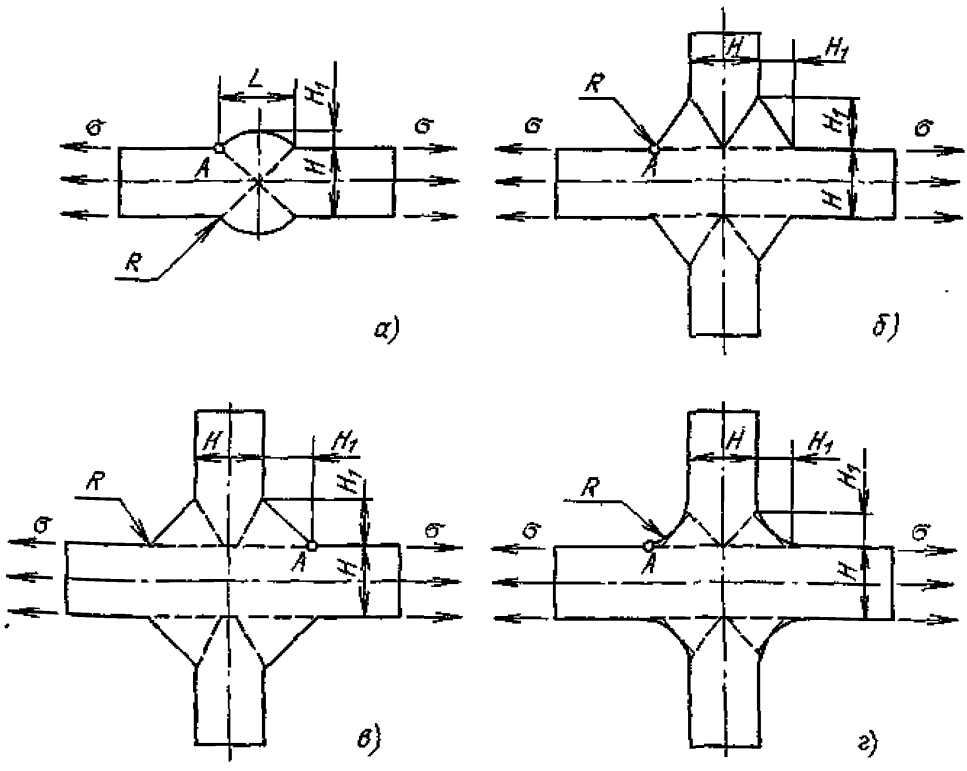



Рис. П3.38. Сварные соединения и схема приложения рабочей нагрузки:
*а*—стыковое соединение; *б*—крестовое соединение со швом, образованным по гипотенузе разностороннего треугольника; *в*—крестовое соединение со швом в форме равнобедренного треугольника; *г*—крестовое соединение со швом вогнутой формы (формулы для $\alpha_\sigma$ приведены ниже)

| Вид сварного соединения | Номинальное напряжение $\sigma_{ном}$ | Формула для определения $\alpha_\sigma$ для точки $A$ |
|---|---|---|
| Рис. П3.38, *а* | $\sigma$ | $\alpha_\sigma = 1 + 1{,}1 H_1 \frac{L^2 + H^2}{H^3} \sqrt{\frac{H_1}{R}}$ |
| Рис. П3.38, *б* | | $\alpha_\sigma = 1 + 0{,}2 \sqrt{\frac{(2H_1 - H_2) H}{H_1 R}}$ |
| Рис. П3.38, *в* | | $\alpha_\sigma = 1 + 0{,}2 \sqrt{\frac{2H - H_1}{R}}$ |
| Рис. П3.38, *г* | | $\alpha_\sigma = 1 + 0{,}4 \sqrt{\frac{2H - H_1}{R}}$ |

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

5.1.1. Условные обозначения, принятые в настоящем разделе:

$\alpha$ — масштаб геометрического подобия
$l$ — линейный размер, мм
$\beta$ — масштаб силового подобия
$P$ — усилие внешней нагрузки, Н (кгс)
$E$ — модуль упругости материала, Па (кгс/мм$^2$)
$\delta$ — масштаб подобия перемещений
$u$ — линейное перемещение
$\eta$ — масштаб подобия моментов
$M$ — момент внешней нагрузки, Н·м (кгс·мм)
$\sigma$ — напряжение, Па (кгс/мм$^2$)
$\sigma_{mL}$ — местные мембранные напряжения, Па (кгс/мм$^2$)
$\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения, Па (кгс/мм$^2$)
$\sigma_m$ — общие мембранные напряжения, Па (кгс/мм$^2$)
$\sigma_b$ — общие изгибные напряжения, Па (кгс/мм$^2$)
$\sigma_{aF}$ — амплитуда местного напряжения с учетом концентрации, Па (кгс/мм$^2$)
$\sigma_{ном}$ — номинальные напряжения, Па (кгс/мм$^2$)
$p$ — давление на единицу поверхности, Па (кгс/мм$^2$)
$Q$ — внутреннее усилие в сечении, Н (кгс)
$m$ — внутренний момент в сечении, Н·м (кгс·мм)
$\varepsilon$ — относительная деформация, отн. ед.
$\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$ — главные относительные деформации, отн. ед.
$\gamma_{xy}$ — относительный сдвиг или угловая деформация, отн. ед.
$G$ — модуль сдвига, Па (кгс/мм$^2$)
$\vartheta_0$ — среднеарифметическое наблюдений при отсутствии нагрузки (нулевое значение)
$\vartheta$ — значение наблюдения
$\bar{\vartheta}$ — среднеарифметическое наблюдений
$n$ — количество повторных наблюдений
$n_1$ — количество анормальных наблюдений
$S^*$ — генеральное среднее квадратическое отклонение
$S_n$ — среднеквадратическое отклонение погрешностей прибора
$\psi$ — предельное значение отклонения для данного объема выборки по $n$ наблюдениям и принятого уровня значимости 0,05. Определяется по ГОСТ 8.207-76
$D$ — диаметр наружной поверхности, мм
$H$ — толщина стенки, мм
$C_1$ — допуск на толщину стенки, мм
$\varphi_0$ — угол между осями деформации $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_0$, рад
$R_n$ — тензочувствительность прибора
$R_t$ — тензочувствительность тензорезистора
$N$ — количество повторных нагружений
$N_1$ — количество анормальных значений деформаций
$\alpha_\sigma$ — коэффициент концентрации напряжений.

Индексы:

$i$—порядковый номер повторного наблюдения
$j$—порядковый номер ступени нагружения
$k$—номер точки измерения
$k$—номер тензорезистора
$p$—действительное значение
н—натура, наружный
м—модель
$b$—изгибный; в—внутренний

5.1.2. Настоящий раздел содержит рекомендации по экспериментальному определению напряжений, деформаций и перемещений.

5.1.3. Деформации, напряжения и перемещения экспериментально определяют на натурных деталях и элементах конструкций или на их моделях. Экспериментальные исследования на моделях могут быть проведены на всех стадиях проектирования объектов. Экспериментальные исследования на натурных объектах могут быть проведены на стадиях изготовления, при заводских и пусковых испытаниях, эксплуатации.

5.1.4. Напряжения, деформации и перемещения экспериментально определяют с применением тензометрирования и поляризационно-оптического метода. Допускается также использование других экспериментальных методов (хрупких покрытий, делительных сеток, муаровых полос). При выборе метода должно быть показано соответствие его возможностей задачам и условиям измерений.

### 5.2. ЦЕЛИ, ОБЪЕКТЫ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.2.1. Экспериментальные исследования напряжений, деформаций и перемещений деталей и элементов конструкций необходимо проводить в тех случаях, когда расчетным путем невозможно с необходимой точностью определить характеристики напряженно-деформированного состояния конструкции. В этом случае оценка прочности объекта должна быть основана на информации, полученной из эксперимента.

5.2.2. Экспериментальные исследования должны дать информацию о напряженно-деформированном состоянии конструкции, необходимую для проверки конструкции на прочность в соответствии с нормами прочности.

5.2.3. Объектом экспериментального исследования может быть натурная деталь, конструкция или соответствующая

модель, выполненная из натурного или другого материала, в том числе полимерного.

5.2.4. Выбор объекта исследования определяется условиями работы натурной детали или конструкции. Необходимо различать следующие основные случаи работы натурных конструкций при возможных сочетаниях действующих силовых и температурных нагрузок:

а) наибольшие деформации не превышают предел текучести;

б) деформация превышает предел текучести.

5.2.5. Для случая а) экспериментальное исследование напряжений деформаций и перемещений может быть проведено на натурной конструкции или ее модели, выполненной из любых материалов, но удовлетворяющей условиям подобия в упругой области («упругая» модель).

5.2.6. В случае б) исследование необходимо проводить на натурной конструкции или модели, выполненной из тех же материалов, что и натурная конструкция («натурная» модель), при нагрузках, соответствующих рабочим, т. е. создающих те же по распределению и значениям относительные деформации. Допускается использование моделей, выполненных из других материалов, но обеспечивающих условия подобия в упругопластической области («упругопластическая» модель).

5.2.7. Виды нагрузок, их предельные численные значения и возможные сочетания для натурной конструкции задаются проектантом на основании рабочих параметров, режимов эксплуатации и условий контрольного испытания проектируемого оборудования и указываются в задании на проведение экспериментального исследования.

5.2.8. При исследовании отдельных деталей и частей натурных конструкций или соответствующих моделей необходимо воспроизводить граничные условия, которые могут быть определены на основании расчета или экспериментального исследования всей конструкции. Допускается проведение испытаний при нагрузках, превышающих определенные при расчете или из эксперимента.

Граничные условия могут быть воспроизведены созданием на границе соответствующих усилий или перемещений, а также использованием дополнительных элементов, примыкающих к исследуемой детали и воздействующих на нее заданным образом.

5.2.9. Измерения деформаций и перемещений необходимо проводить в строго установленных, контролируемых и регистрируемых условиях при действии силовых и температурных нагрузок в соответствии с заданными режимами.

### 5.3. УПРУГИЕ МОДЕЛИ И УСЛОВИЯ ИХ НАГРУЖЕНИЯ

5.3.1. Модели и прилагаемые к ним нагрузки должны удовлетворять соответствующим условиям моделирования, обеспечивающим возможность перехода от деформаций, напряжений и перемещений в модели к деформациям, напряжениям и перемещениям в натуре.

5.3.2. Модель должна быть выполнена с полным соблюдением геометрического и силового подобия натуре. Места приложения нагрузок в модели должны соответствовать местам их приложения в натуре, а значения всех прилагаемых нагрузок в модели и в натуре — пропорциональны с одним и тем же для всех нагрузок коэффициентом пропорциональности. Допускаемые отклонения геометрических размеров и внешних силовых факторов в модели и в натуре должны быть согласованы в соответствии с требованиями геометрического и силового подобия. Допускается отступление от полного подобия, не приводящее к изменению напряженно-деформированного состояния в исследуемых зонах. При этом любые отступления от полного геометрического и силового подобия, в том числе замена объемной модели плоской, должны быть обоснованы в каждом конкретном случае. Для обоснования могут привлекаться как теоретические, так и экспериментальные данные.

5.3.3. Применяемые материалы и технология изготовления модели должны обеспечить выполнение всех размеров и особенностей формы, влияющих на напряженное состояние исследуемой конструкции.

5.3.4. Если натурная конструкция выполняется из материалов с различными модулями упругости, то ее упругая модель должна быть выполнена из материалов, имеющих те же соотношения модулей упругости.

5.3.5. При исследованиях термоупругих напряжений с применением нагрева или охлаждения необходимо модели выполнять из материалов с теми же соотношениями произведений температурного коэффициента линейного расширения и модуля упругости, какие имеют материалы соответствующих частей натурной конструкции.

5.3.6. Значения наибольших нагрузок на упругие модели, выполненные из материала, отличного от материала натуры, выбирают такими, чтобы деформации в модели не превосходили предел пропорциональности, а также были обеспечены условия прочности модели.

В случае модели из низкомодульных материалов, например из пластмасс, наибольшие нагрузки должны быть ограничены такими значениями, чтобы при их приложении не возникало искажения геометрической формы модели, влияющего на возникающие напряжения и перемещения.

5.3.7. В «упругих» моделях при линейной зависимости между нагрузками и перемещениями напряжения и перемещения от одновременного действия всех нагрузок можно получить на основании принципа наложения, т. е. соответствующим сложением в каждой рассматриваемой точке результатов, полученных от отдельных нагрузок. Принцип наложения не сохраняется при нелинейной зависимости между нагрузками и перемещениями, например при полном выборе зазоров в процессе нагружения, наличии обширных контактных зон, влияющих на напряжения в исследуемых местах. В этом случае исследование должно выполняться при одновременном действии всех нагрузок.

5.3.8. При наличии в «упругой» модели составных контактирующих деталей, где могут действовать силы трения и изменяться зазоры и контактные условия, необходимо в модели реализовать соответствующие зависимости. При этом соединение деталей с натягом, обеспечивающим отсутствие взаимного смещения положения контактирующих поверхностей, может рассматриваться как монолитное. В зонах контакта достаточно воспроизвести правильно лишь равнодействующие усилия, если напряжения определяют в местах, удаленных от этих зон.

5.3.9. Результаты измерений деформаций и перемещений, полученные для линейных задач (линейная зависимость напряжений и перемещений от нагрузки при различных случаях нагружения), должны быть пересчитаны по критериям подобия на натурную конструкцию для значений расчетных нагрузок. В случае нелинейных задач полученные результаты следует относить к нагрузкам натурной конструкции, соответствующим тем, при которых проведены измерения.

### 5.4. УСЛОВИЯ УПРУГОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПЕРЕСЧЕТ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НА НАТУРНУЮ КОНСТРУКЦИЮ

5.4.1. Модель должна быть выполнена геометрически подобной натуре с соблюдением масштаба геометрического подобия

$$\alpha = l_{н}/l_{м}.$$

5.4.2. Значения прилагаемых к модели нагрузок определяют по значениям нагрузок в натуре с соблюдением масштаба силового подобия

$$\beta = P_{к}/P_{м}.$$

5.4.3. В общем случае моделирования необходимо, чтобы деформации в натуре и модели были одинаковы. Это должно выполняться, если выбираемые при нагружении зазоры приводят к изменению распределений напряжений в рассматриваемых

зонах или если моделируются большие перемещения. При этом масштабы геометрического и силового подобия связаны зависимостью

$$\beta = \alpha^2 E_н / E_м,$$

а масштаб линейных размеров равен масштабу перемещений

$$\delta = u_н / u_м.$$

5.4.4. В тех случаях, когда перемещения в модели оказываются достаточно малыми и не приводят к нарушению геометрического подобия модели и натуры или нелинейной зависимости напряжений от нагрузки, масштабы геометрического $\alpha$ и силового $\beta$ подобия могут быть назначены независимо.

5.4.5. При выполнении условий п. 5.4.4, если в модели имеются зазоры и технологические допуски, выбираемые в процессе нагружения, то они должны быть выполнены не в масштабе геометрического подобия, а в масштабе перемещений

$$\delta = \frac{\beta}{\alpha}\frac{E_м}{E_н},$$

который может быть отличным от масштаба геометрического подобия $\alpha$.

5.4.6. Моменты нагрузок, прикладываемых к модели, подсчитывают в соответствии с масштабом

$$\eta = M_н / M_м,$$

который не является независимым и должен быть определен по формуле

$$\eta = \alpha\beta.$$

5.4.7. Пересчет перемещений, напряжений и внутренних силовых факторов с модели на натуру осуществляют по формулам, приведенным в табл. П 3.19, которые соответствуют случаю независимости масштабов $\alpha$ и $\beta$ и неравенства масштабов $\alpha$ и $\delta$, формулы справедливы и в случае п. 5.4.3.

### 5.5. ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ

5.5.1. Тензометрирование является одним из основных экспериментальных методов исследования напряженного и деформированного состояния конструкций при изучении поведения натурных объектов в период пусконаладочных и эксплуатационных работ, а также исследования в лабораторных условиях напряженного состояния конструкций на моделях на стадии проектирования.

Этот метод используется в широком диапазоне деформаций, температур и потоков ионизирующего излучения при действии

Таблица П3.19. **Формулы для пересчета экспериментальных данных с модели на натуру**

| Вид внешней нагрузки | Пересчитываемая величина | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Напряжение $\sigma$ | Внутренний момент $m$ | Внутреннее усилие $Q$ | Линейное перемещение $u$ |
| Давление $p$ | $\sigma_н = \frac{p_н}{p_м}\sigma_м$ | $m_н = \alpha^3 \frac{p_н}{p_м} m_м$ | $Q_н = \alpha^2 \frac{p_н}{p_м} Q_м$ | $u_н = \alpha \frac{p_н}{p_м}\frac{E_м}{E_н} u_м$ |
| Изгибающий момент $M$ | $\sigma_н = \frac{\eta}{\alpha^3}\sigma_м$ | $m_н = \eta m_м$ | $Q_н = \frac{\eta}{\alpha} Q_м$ | $u_н = \frac{\eta}{\alpha^2}\frac{E}{E_н} u_м$ |
| Сосредоточенное усилие $P$ | $\sigma_н = \frac{\beta}{\alpha^2}\sigma_м$ | $m_н = \alpha\beta m_м$ | $Q_н = \beta Q_м$ | $u_н = \frac{\beta E_м}{\alpha E_н} u_м$ |
| Линейное перемещение $u$ | $\sigma_н = \frac{\delta E_н}{\alpha E_м}$ | $m_н = \alpha^2 \delta \frac{E_н}{E_м} m_м$ | $Q_н = \alpha\delta \frac{E_н}{E_м} Q_м$ | $u_н = \delta u_м$ |

на объекты статических, квазистатических и динамических нагрузок.

5.5.2. Типы тензорезисторов должны выбираться с учетом целей и условий эксперимента.

Для исследований следует применять тензорезисторы, выпускаемые серийно на отечественных (или зарубежных) предприятиях, прошедшие поверочный контроль и имеющие паспорт, содержащий их метрологические характеристики. При применении нестандартных тензорезисторов следует приводить в отчетах метрологические характеристики тензорезисторов и методики, по которым они определены.

5.5.3. При тензометрировании в условиях повышенных температур применяются самокомпенсированные тензорезисторы, методы схемной компенсации или методы внесения поправок по метрологическим характеристикам применяемых тензорезисторов.

5.5.4. Средства защиты тензорезисторов от агрессивных средств и механических повреждений не должны влиять на метрологические характеристики тензорезисторов и искажать напряженное состояние исследуемого элемента.

5.5.5. Все приборы, применяемые для измерения деформаций и температур, перед каждым испытанием или серией испытаний должны пройти метрологическую поверку по стандартным контрольно-измерительным приборам. Приборы должны проходить поверку не реже чем 2 раза в год.

5.5.6. При проведении комплексных испытаний целесообразно автоматизировать процесс измерений и регистрации данных, применять ЭВМ для обработки результатов экспериментов.

5.5.7. Регистрация наблюдений при испытании объекта исследования на каждой ступени нагружения (режиме) повторяется не менее 3 раз. (Практически кратность повторных наблюдений составляет 3—15.)

5.5.8. Результаты наблюдений для математической обработки представляются в виде последовательности цифр в функции времени (регистрация на цифропечатающих или перфорирующих устройствах) или в виде таблиц (составленных экспериментатором).

5.5.9. Для определения действительного значения показаний каждого тензорезистора на каждой ступени нагружения $\bar{\vartheta}^j_{кр}$ проводят упорядочение выборки наблюдений, а именно:

подсчитывают среднее значение

$$\bar{\vartheta}^j_к = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \vartheta^j_{ik};$$

проверяют значимость каждого из $n$ наблюдений по условию

$$\frac{|\vartheta_{i\text{к}}^{j}-\bar{\vartheta}_{\text{к}}^{j}|}{S^{*}}\leqslant\psi,$$

а в случае невыполнения неравенства признают данное наблюдение аномальным и исключают его из рассматриваемой выборки;

подсчитывают $\bar{\vartheta}_{\text{кр}}^{j}$ как среднеарифметическое значимых наблюдений выборки

$$\bar{\vartheta}_{\text{кр}}^{j}=\frac{1}{n-n_1}\sum_{i=1}^{n-n_1}\vartheta_{i\text{к}}^{j}.$$

5.5.10. При однократном наблюдении единственный отсчет (наблюдение) по прибору принимается за действительный результат измерения. Погрешность результата оценивается по результатам градуировки тензометрических преобразователей и приборов (тензометрической системы измерения в целом) или по погрешностям, указанным в паспортных данных.

5.5.11. Деформации определяются по действительным наблюдениям

$$\varepsilon_{\text{кр}}^{j}=\left(\bar{\vartheta}_{\text{кр}}^{j}-\bar{\vartheta}_{\text{кр}}^{0}\right)\frac{R_{\text{п}}}{R_{T_i}}.$$

При возможности повторного воспроизведения условий нагружения объекта исследования значения относительных деформаций определяются для каждого повторного нагружения, после чего проводится упорядочение выборки относительных деформаций по $N$ повторным нагружениям

$$(N\geqslant 3)\quad \bar{\varepsilon}_{\text{к}}^{j}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\varepsilon_{i\text{к}}^{j}$$

и проверяется их значимость

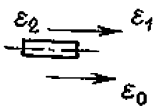
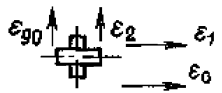
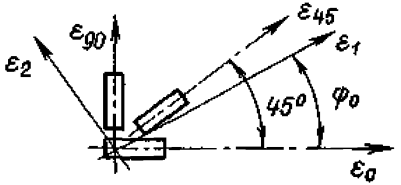
$$\frac{|\varepsilon_{i\text{к}}^{j}-\bar{\varepsilon}_{\text{к}}^{j}|}{S^{*}}\leqslant\psi.$$

Действительное значение деформаций определяется по формуле

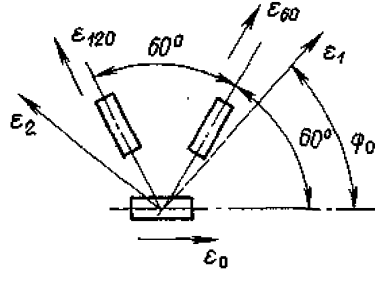
$$\bar{\varepsilon}_{\text{кр}}^{j}=\frac{1}{N-N_1}\sum_{i=1}^{N-N_1}\varepsilon_{i\text{к}}^{j}.$$

5.5.12. При известных зависимостях деформаций от нагрузок действительное значение деформаций следует определять методом наименьших квадратов с использованием приема выравнивания.

Таблица П3.20. **Определение главных деформаций $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$ и их направлений по измеренным относительным деформациям**

| Тип напряженного состояния и расположение тензорезисторов | Относительные деформации, измеренные тензорезистором | Определение $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\gamma_{xy}$ и главных направлений |
|---|---|---|
| **Тензорезисторы расположены по известным направлениям главных деформаций** | | |
| Линейное напряженное состояние (направление $\varepsilon_1$)<br> | $\varepsilon_0$ | $\varepsilon_1=\varepsilon_0$;<br>$\varepsilon_2=-\mu\varepsilon_0$ |
| Плоское напряженное состояние<br> | $\varepsilon_0$, $\varepsilon_{90}$<br>$\varepsilon_0 \geqslant \varepsilon_{90}$ | $\varepsilon_1=\varepsilon_0$;<br>$\varepsilon_2=\varepsilon_{90}$ |
| **Направления главных деформаций неизвестны** | | |
| Плоское напряженное состояние (углы между осью и осями тензорезисторов 0, 45° и 90°)<br> | $\varepsilon_0$, $\varepsilon_{45}$, $\varepsilon_{90}$ | $\gamma_{xy}=2\varepsilon_{45}-(\varepsilon_0+\varepsilon_{90})$;<br>$\operatorname{tg} 2\varphi_0=\dfrac{2\varepsilon_{45}-(\varepsilon_0+\varepsilon_{90})}{\varepsilon_0-\varepsilon_{90}}$;<br>$\varepsilon_{1,2}=\dfrac{\varepsilon_0+\varepsilon_{90}}{2}\pm\dfrac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\varepsilon_0-\varepsilon_{45})^2+(\varepsilon_{45}-\varepsilon_{90})^2}$ |

*Продолжение табл. П3.20*

| Тип напряженного состояния и расположение тензорезисторов | Относительные деформации, измеренные тензорезистором | Определение $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\gamma_{xy}$ и главных направлений |
|---|---|---|
| Плоское напряженное состояние (углы между осью и осями тензорезисторов 0, 60° и 120°)<br> | $\varepsilon_0$, $\varepsilon_{60}$, $\varepsilon_{120}$ | $\gamma_{xy}=\frac{2}{\sqrt{3}}(\varepsilon_{60}-\varepsilon_{120})$;<br>$\operatorname{tg} 2\varphi_0=\frac{\sqrt{3}(\varepsilon_{60}-\varepsilon_{120})}{2\varepsilon_0-\varepsilon_{60}-\varepsilon_{120}}$;<br>$\varepsilon_{1,2}=\frac{1}{3}(\varepsilon_0+\varepsilon_{60}+\varepsilon_{120})\pm\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_0-\varepsilon_{60})^2+(\varepsilon_0-\varepsilon_{120})^2+(\varepsilon_{60}-\varepsilon_{120})^2}$ |

5.5.13. Главные деформации $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$ и их направления определяются в соответствии с табл. П3.20 по действительным значениям деформаций.

5.5.14. Главные напряжения $\sigma_1$ и $\sigma_2$ определяются по главным деформациям $\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2$, в точках измерения детали (модели) по формулам:

для плоского напряженного состояния

$$\sigma_1=\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1+\mu\varepsilon_2);\quad \sigma_2=\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2+\mu\varepsilon_1);$$

для одноосного напряженного состояния

$$\sigma_1=E\varepsilon_1.$$

Максимальные касательные напряжения определяют по формуле

$$\tau_{xy}=G\gamma_{xy}.$$

5.5.15. Пересчет напряжений с модели на натуру осуществляется по формулам, приведенным в разд. 5.4.

5.5.16. Прочность конструкции по напряжениям, полученным экспериментально, оценивают в соответствии с разд. 4 настоящих норм.

5.5.17. Результаты тензометрирования представляются по категориям и группам категорий напряжений, регламентируемых оценкой прочности исследуемых конструкций (табл. П3.21).

### 5.6. ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД

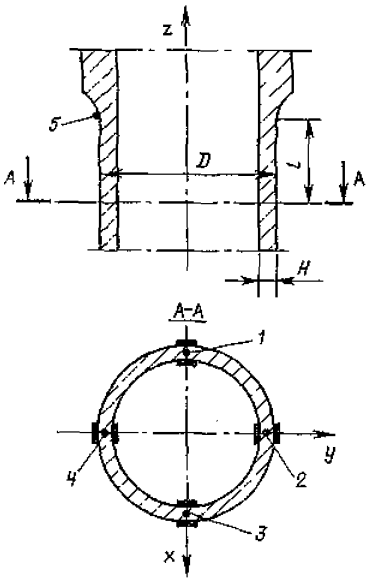
5.6.1. Поляризационно-оптический метод применяется для определения полей деформаций и напряжений в деталях и конструкциях при действии статических силовых нагрузок и температурных полей. Он используется преимущественно в условиях лабораторных и стендовых испытаний для исследования зон с высокими градиентами напряжений.

5.6.2. Исследования поляризационно-оптическим методом выполняют на моделях из прозрачных оптически чувствительных материалов или с применением наносимых на исследуемую поверхность покрытий из оптически чувствительных материалов.

5.6.3. В качестве оптически чувствительных материалов для моделей и покрытий обычно используют сетчатые полимеры, например отвержденные эпоксидные смолы.

Оптически чувствительный материал должен иметь достаточные прозрачность и оптическую чувствительность к деформациям, оптическую изотропию в недеформированном состоянии и стабильность оптико-механических свойств во

Таблица П3.21. **Примеры выделения категорий напряжений**

| Объект исследования | Категории напряжений | Формула |
|---|---|---|
| Корпус, трубопровод, патрубок и т. п.   | Местные мембранные* $\sigma_{mL}$ (при $l \leqslant 0{,}7\sqrt{D(H-C_1)}$) | $0{,}5\left(\sigma_k^{II}+\sigma_k^{II}\right)$ |
| | Компенсации растяжения или сжатия* $\sigma_{\text{комп}}$ | $0{,}25\sum_{k=1}^{4}0{,}5\left(\sigma_k^{II}+\sigma_k^{II}\right)$ |
| | Общие изгибные* $\sigma_b^{M_y}$ от изгибающего момента $M_y$ | $0{,}5\left(\sigma_1^{II}+\sigma_1^{II}-\sigma_3^{II}-\sigma_3^{II}\right)$ |
| | Общие изгибные* $\sigma_b^{M_x}$ от изгибающего момента $M_x$ | $0{,}5\left(\sigma_2^{II}+\sigma_2^{II}-\sigma_4^{II}-\sigma_4^{II}\right)$ |
| | Общие изгибные* $\sigma_b$ от изгибающего момента $M=\sqrt{M_x^2+M_y^2}$ | $\sqrt{\left(\sigma_b^{M_y}\right)^2+\left(\sigma_b^{M_x}\right)^2}$ |
| | Местные изгибные* $\sigma_{bL}$ | $0{,}5\left(\sigma_k^{II}-\sigma_k^{II}\right)$ |

* Определяются в сечении $A-A$.

времени. Механические свойства материала для модели должны обеспечивать выполнение критериев подобия модели и натурного образца, а материала для покрытий — возможность совместного деформирования покрытия и поверхности исследуемой детали при сохранении линейной зависимости оптического эффекта от деформаций во всем диапазоне деформаций поверхности исследуемой детали.

5.6.4. Упругие напряжения в объемной конструкции от действия статических силовых нагрузок определяют с применением объемной модели, исследуемой по методу «замораживания» деформаций. При этом напряжения могут быть определены как на поверхности, так и внутри объема исследуемой конструкции.

5.6.5. Упругие напряжения на наружной поверхности конструкции при действии нескольких прикладываемых поочередно силовых статических нагрузок определяют на «упругой» модели (см. п. 5.2.5 настоящего приложения) с применением покрытий из оптически чувствительного материала. Возможно также исследование на моделях по методу «замораживания» деформаций. При этом требуемое число моделей равно числу отдельно рассматриваемых нагрузок.

5.6.6. Упругопластические напряжения и деформации на наружной поверхности конструкции при действии силовой статической нагрузки определяют на натурной конструкции или ее «натурной» модели (см. п. 5.2.6 настоящего приложения) с применением покрытий из оптически чувствительного материала.

5.6.7. Упругие напряжения в конструкции, выполненной из материалов с различными коэффициентами линейного расширения, от действия однородного температурного поля определяют на объемной «замораживаемой» модели, составленной из элементов с предварительно «замороженными» деформациями, соответствующими свободным температурным расширениям, взятым с обратным знаком.

5.6.8. Термоупругие напряжения от действия статических и квазистатических (медленно меняющихся во времени) температурных полей определяют с применением объемной «замораживаемой» модели, составленной из элементов с предварительно «замороженными» деформациями, соответствующими свободным температурным расширениям, взятым с обратным знаком.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 4*
(рекомендуемое)

# РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее приложение к Нормам содержит основные положения и метод расчета на прогрессирующее формоизменение.

1.2. Данный материал рекомендуется использовать при проведении поверочного расчета на прогрессирующее формоизменение по разд. 5.10 Норм.

1.3. Наряду с приведенными методом и формулами допускают использование для расчета других методов и формул, в частности, позволяющих получить результаты с большей точностью.

1.4. При расчете на прогрессирующее формоизменение определяют изменение форм и размеров конструкции, возникающих в результате как процесса накопления необратимых пластических деформаций, непрерывно нарастающих с увеличением числа циклов, так и радиационного распухания.

1.5. Условия возникновения прогрессирующего формоизменения элементов конструкций определяют по теории приспособляемости упругопластических тел при повторных нагружениях и экспериментальным данным.

1.6. Расчет на прогрессирующее формоизменение проводят для случаев, указанных в разд. 5.10 Норм. Правила расчета не распространяются на резьбовые соединения, шпонки, штифты и т. п.

1.7. Расчет проводят для нормальных условий и при нарушении нормальных условий эксплуатации с учетом всех расчетных нагрузок, указанных в п. 5.1.3 Норм.

1.8. На условия возникновения и развития прогрессирующего формоизменения влияют механические нагрузки и температура, а также характер их изменения (по объему конструкции и во времени), геометрические особенности детали (размеры, способ закрепления и т. п.), температурно-временная зависимость механических характеристик материала и радиационное распухание.

1.9. Необходимым условием возникновения прогрессирующего формоизменения является неодновременность достижения максимальных напряжений в различных точках детали. Предельными в этом смысле внешними воздействиями являются

циклически повторяющиеся подвижные механические нагрузки и «подвижные» (квазистационарные относительно движущейся системы координат) поля температур.

Поля температур такого типа, в частности, могут возникнуть в стенках сосудов при циклических изменениях уровня теплоносителя, при быстром изменении температуры теплоносителя, при быстром изменении тепловыделения в трубах, внутри которых расположены конструкции, обладающие достаточно большой теплоемкостью.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ. РАСЧЕТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

2.1. Цикл изменения напряжений во всех режимах при нормальных условиях и при нарушении нормальных условий эксплуатации называется здесь рабочим циклом, а механические, тепловые и иные нагрузки — его параметрами.

2.2. Цикл изменений напряжений, который соответствует началу прогрессирующего формоизменения, т. е. является границей между прогрессирующими формоизменением и приспособляемостью, называют предельным.

*Под прогрессирующим формоизменением* понимается процесс накопления односторонних пластических необратимых деформаций (перемещений), неодновременных по объему элемента конструкции, малых в каждом цикле изменения напряжений и температур.

*Под приспособляемостью конструкции* понимается прекращение циклической пластической деформации после некоторого числа первых циклов, главным образом вследствие образования благоприятного поля остаточных напряжений.

2.3. При проведении первого этапа расчета (разд. 5 Норм) используют условные напряжения в рабочем цикле $\sigma_i^{(e)}$ от механических нагрузок и неравномерного нагрева конструкции (вычисленные в предположении идеальной упругости материала) Соответствующие им приведенные напряжения вычисляют по теории наибольших касательных напряжений.

2.4. Условные упругие напряжения в предельном цикле принимают пропорциональными условным упругим напряжениям рабочего цикла, т. е. отношение указанных напряжений $n$ является одинаковым для всех точек конструкции при всех режимах, составляющих цикл.

2.5. Условные упругие напряжения в рабочем цикле вычисляют раздельно для стационарных режимов и ряда моментов времени переходных режимов. Режимы и моменты времени внутри отдельных режимов, для которых подсчитывают напряжения $\sigma_i^{(e)}$, должны быть выбраны так, чтобы в итоге в каждой

точке конструкции можно было найти минимальную (за время цикла) разность предельных $\sigma_s$ (которые выбирают различными в зависимости от эксплуатационных режимов рабочего цикла в соответствии с разд. 3 данного приложения) и приведенных условных упругих напряжений.

2.6. Условные упругие напряжения в рабочем цикле $\sigma_l^{(e)}$ для корпусов и внутрикорпусных деталей реакторов, парогенераторов и сосудов получают суммированием общих или местных мембранных напряжений, общих и местных изгибных напряжений и общих температурных напряжений (включая напряжения от изменения температуры по толщине стенки).

2.7. Условные упругие напряжения в рабочем цикле $\sigma_l^{(e)}$ для трубопроводов получают суммированием общих или местных мембранных напряжений, общих и местных изгибных напряжений, общих температурных напряжений (включая напряжения от градиентов температуры по толщине стенки) и напряжений компенсации (мембранных, кручения и изгибных).

## 3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

3.1. Для переходных режимов работы предельное напряжение $\sigma_s$ принимают равным пределу текучести материала $R^T_{p0,2}$, деленному на коэффициент:

$$\sigma_s = R^T_{p0,2}/n_{0,2},$$

где $n_{0,2} = 1{,}5$.

Значение $R^T_{p0,2}$ принимается в соответствии с пп. 3.7 и 3.8 Норм при действующей в рассматриваемый момент переходного режима температуре точки конструкции.

3.2. Для стационарных режимов работы предельное напряжение принимают равным

$$\sigma_s = \min\{R^T_{p0,2}/n_{0,2};\ R^T_{mt}/n_{mt}\},$$

где $n_{0,2} = 1{,}5$; $n_{mt} = 1{,}5$.

Значения $R^T_{p0,2}$ и $R^T_{mt}$ принимаются в соответствии с пп. 3.7; 3.8 Норм при расчетной температуре металла в стационарном режиме с учетом возможного снижения их значений при нейтронном облучении.

## 4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\sigma_s$ — предельное напряжение, МПа (кгс/мм$^2$)

$\sigma_i^{(e)}$ — составляющие условного упругого напряжения в рабочем цикле, МПа (кгс/мм$^2$)

$n$ — отношение условных упругих напряжений в предельном цикле к соответствующим напряжениям рабочего цикла

$\sigma_\varphi^{(e)}$, $\sigma_\theta^{(e)}$, $\sigma_r^{(e)}$ — меридиональная, кольцевая и радиальная составляющие условного нормального упругого напряжения в рабочем цикле, МПа (кгс/мм$^2$)

$\rho_\varphi$, $\rho_\theta$, $\rho_r$ — составляющие остаточного напряжения, МПа (кгс/мм$^2$)

$h$ — половина толщины оболочки (пластинки), мм

$z$ — координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки (пластинки) по нормали к этой поверхности, мм

$t$ — время (от начала цикла), ч

$\Delta\varepsilon$ — накопленная деформация за цикл, %

$\Delta l$ — необратимое изменение размеров на длине $l$, мм

## 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ

5.1. Вычисленные в разд. 3 настоящего приложения приведенные условные упругие напряжения в рабочем цикле сопоставляют с предельными напряжениями $\sigma_s$. Если во всех точках конструкции приведенные упругие напряжения не превышают величины $\sigma_s$, то конструкция работает упруго во всех циклах (начиная с первого). В этом случае расчет на прогрессирующее формоизменение не проводят.

5.2. Если приведенные условные упругие напряжения в рабочем цикле превышают величину $\sigma_s$ в какие-либо моменты времени, то конструкции рассчитывают на прогрессирующее формоизменение.

Расчет выполняют по этапам, причем переход к следующему этапу определяется результатами предыдущего.

5.3. На первом этапе проверяют, прекратится ли одностороннее пластическое деформирование после нескольких первых циклов за счет образования благоприятного поля остаточных напряжений в процессе деформирования. Для этого сопоставляют условные упругие напряжения (или параметры) рабочего и предельного циклов. Расчет предельного (по условиям прогрессирующего формоизменения) цикла проводят методами теории приспособляемости с использованием вычисленных в разд. 2 и 3 напряжений $\sigma_i^{(e)}$ и $\sigma_s$ (для осесимметричных оболочек и круглых пластинок см. разд. 5.5).

5.4. Прогрессирующего формоизменения не будет, если параметры рабочего цикла (механические нагрузки и темпера-

туры) не превышают параметров предельного по прогрессирующему формоизменению цикла.

5.5. Для осесимметричных оболочек (цилиндрических, сферических, тороидальных, конических и т. п.) и круглых пластинок, испытывающих в рабочем цикле воздействия осесимметричных нагрузок и температурных полей, оценка условий возникновения прогрессирующего формоизменения делится на два подэтапа:

а) проверяют, возможно ли прекращение накопления односторонних пластических деформаций после ограниченного числа первых циклов за счет перераспределения напряжений в каждом сечении независимо от соседних сечений (т. е. без изменения усилий, вычисленных в каждом сечении оболочки в предположении идеальной упругости материала).

Соответствующее условие формулируется следующим образом: прогрессирующего формоизменения не будет, если в каждом меридиональном сечении оболочки (пластинки) выполняются неравенства

$$\left.\begin{aligned}
&\int_{-h}^{h} \min_t \left[\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right] dz \geqslant 0; \quad \int_{-h}^{h} \max_t \left[-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right] dz \leqslant 0;\\
&\int_{0}^{h} \min_t \left[\left(\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right) z\right] dz + \int_{-h}^{0} \min_t \left[\left(-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right) z\right] dz \geqslant 0;\\
&\int_{0}^{h} \max_t \left[\left(-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right) z\right] dz + \int_{-h}^{0} \max_t \left[\left(\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right) z\right] dz \leqslant 0;
\end{aligned}\right\}$$

в каждом кольцевом сечении оболочки (пластинки) выполняются неравенства

$$\left.\begin{aligned}
&\int_{-h}^{h} \min_t \left[\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right] dz \geqslant 0; \quad \int_{-h}^{h} \max_t \left[-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right] dz \leqslant 0;\\
&\int_{0}^{h} \min_t \left[\left(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right) z\right] dz + \int_{-h}^{0} \min_t \left[\left(-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right) z\right] dz \geqslant 0;\\
&\int_{0}^{h} \max_t \left[\left(-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right) z\right] dz + \int_{-h}^{0} \max_t \left[\left(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right) z\right] dz \leqslant 0;
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

в каждом сечении оболочки выполняются неравенства

$$\left.\begin{aligned}
&\int_{-h}^{h} \min_t \left[\sigma_s - \left(\sigma_\varphi^{(e)} - \sigma_\theta^{(e)}\right)\right] dz \geqslant 0;\\
&\int_{-h}^{h} \max_t \left[-\sigma_s - \left(\sigma_\varphi^{(e)} - \sigma_\theta^{(e)}\right)\right] dz \leqslant 0;\\
&\int_{0}^{h} \min_t \left\{\left[\sigma_s - \left(\sigma_\varphi^{(e)} - \sigma_\theta^{(e)}\right)\right] z\right\} dz +\\
&+ \int_{-h}^{0} \min_t \left\{\left[-\sigma_s - \left(\sigma_\varphi^{(e)} - \sigma_\theta^{(e)}\right)\right] z\right\} dz \geqslant 0.
\end{aligned}\right\}$$

Выполнение последних трех неравенств в (1) проверяют только в тех случаях, когда в каких-либо точках оболочки (пластинки) минимальные (за цикл) значения разностей $\sigma_s^{(e)}=|\sigma_\varphi^{(e)}-\sigma_\theta^{(e)}|$ оказываются меньше, чем минимальные (за цикл) значения разностей $\sigma_s-|\sigma_\varphi^{(e)}|$ и $\sigma_s-|\sigma_\theta^{(e)}|$.

Символы min и max указывают, что из всех (отвечающих различным моментам времени $t$ в течение рабочего цикла) значений величин, стоящих в скобках, выбирают минимальные (максимальные), с которыми затем уже проводят операцию интегрирования по толщине стенки;

б) если неравенства, приведенные в разд. 5.5 а, не выполняются, то параметры предельного цикла могут быть определены (для цилиндрических и сферических оболочек и круглых пластинок) из диаграмм приспособляемости (разд. 7), построенных для различных типов механических нагрузок и полей температур, а также различных программ изменения температур и нагрузок во времени.

При отсутствии подходящей диаграммы приспособляемости параметры предельного цикла определяют общими методами теории приспособляемости.

5.6. Ниже приводится описание общих методов расчета условий приспособляемости.

5.6.1. Параметры предельного цикла (предельные диапазоны изменения механических нагрузок и температурных полей) являются максимальными значениями параметров (в рассматриваемой задаче), при которых выполняются условия приспособляемости, приведенные в п. 5.6.2, и минимальными значениями параметров, при которых выполняются условия неприспособляемости, приведенные в п. 5.6.5.

5.6.2. Конструкция приспособится к внешним воздействиям, если может быть задано такое распределение не изменяющихся во времени остаточных напряжений (удовлетворяющих условиям равновесия при нулевых внешних нагрузках), при котором суммарные (включающие переменные условные упругие напряжения от внешних воздействий и постоянные остаточные напряжения) приведенные (согласно критерию максимальных касательных напряжений) напряжения не превышают предельных напряжений $\sigma_s$ ни в один момент времени, ни в одной ее точке.

Применительно к осесимметричным конструкциям, когда направления главных напряжений $\sigma_\varphi$, $\sigma_\theta$, $\sigma_z$ известны и не изменяются в течение цикла, условия приспособляемости формулируются следующим образом:

конструкция приспособится к внешним воздействиям, если может быть задано такое распределение не зависящих от времени остаточных напряжений $\rho_\varphi$, $\rho_\theta$, $\rho_z$ (удовлетворяющих

условиям равновесия при нулевых нагрузках), которое обеспечивает для всех точек конструкции выполнение неравенства

$$\max_t \{\max [|\sigma_\varphi^{(e)}(t)-\sigma_\theta^{(e)}(t)+\rho_\varphi-\rho_\theta|,\ |\sigma_\varphi^{(e)}(t)-\sigma_z^{(e)}(t)+\rho_\varphi-\rho_z|,$$

$$|\sigma_\theta^{(e)}(t)-\sigma_z^{(e)}(t)+\rho_\theta-\rho_z|]-\sigma_s\}\leqslant 0.$$

5.6.3. При наличии не изменяющихся во времени механических нагрузок (вес конструкции и присоединенных агрегатов, постоянное гидростатическое давление и т. п.) последние могут быть непосредственно включены в условия равновесия, упомянутые в п. 5.6.2, которые теперь должны выполняться не при нулевых, а при заданных постоянных нагрузках. Соответственно в условиях приспособляемости будут фигурировать не остаточные напряжения, а напряжения, уравновешенные постоянными нагрузками. При этом условные упругие напряжения от указанных нагрузок вычислять не нужно.

5.6.4. При нарушении условий приспособляемости может возникнуть знакопеременное пластическое течение (обычно локального характера) либо накопление односторонней деформации с каждым циклом (прогрессирующее формоизменение), охватывающее весь конструкционный элемент или его часть.

Знакопеременное течение возникает, если хотя бы для одной точки конструкции не могут быть заданы такие постоянные напряжения, при которых их сумма с условными упругими напряжениями от внешних воздействий (имеются в виду приведенные напряжения) не превышала бы напряжения $\sigma_s$ во все моменты времени цикла. В частности, в случае, когда напряжения изменяются в конструкции пропорционально одному параметру, знакопеременное течение возникает, если размах условных упругих напряжений превысит $2\sigma_s$.

При отсутствии знакопеременного течения прогрессирующее формоизменение будет иметь место, если постоянные напряжения, необходимые для того, чтобы суммарные напряжения в каждой точке тела за время цикла не превышали $\sigma_s$, не удовлетворяют условиям равновесия конструкции при заданных не изменяющихся во времени нагрузках (в частном случае — при нулевых нагрузках, если постоянные внешние силы отсутствуют).

5.6.5. Наряду с приведенными выше «статическими» формулировками для получения верхних оценок условий возникновения прогрессирующего формоизменения могут быть использованы следующие «кинематические» формулировки. Прогрессирующее формоизменение обязательно возникает, если можно задать такое (отличное от нулевого) распределение приращений за цикл необратимых деформаций, удовлетворяющее условиям

совместности деформаций, при котором работа минимальных (за цикл) разностей предельных напряжений $\sigma_s$ и упругих напряжений от внешних воздействий (на указанных приращениях необратимых деформаций), вычисленная для всего объема конструкционного элемента, неположительна.

Применительно к осесимметричным конструкциям, когда направления главных напряжений $\sigma_\varphi$, $\sigma_\theta$, $\sigma_z$ известны и не изменяются в течение цикла, условие существования прогрессирующего формоизменения формулируется следующим образом:

*прогрессирующее формоизменение имеет место, если можно* задать такое распределение ненулевых приращений пластических деформаций за цикл $\Delta\varepsilon_\varphi$, $\Delta\varepsilon_\theta$, $\Delta\varepsilon_z$, удовлетворяющее условиям совместности и несжимаемости, при котором обеспечивается выполнение неравенства

$$\int_V \left\{ a \sum_{i+} \min_t \left\{ \left[ \sigma_s - \left( \sigma_i^{(e)} - \sigma_j^{(e)} \right) \right] \Delta\varepsilon_{i+} \right\} + \right.$$

$$\left. + b \sum_{i-} \min_t \left\{ \left[ -\sigma_s - \left( \sigma_i^{(e)} - \sigma_j^{(e)} \right) \right] \Delta\varepsilon_{i-} \right\} \right\} dV +$$

$$+ \sum_\mu \int_{s_\mu} \left\{ \min_t \left[ \left( \sigma_s - \sigma_i^{(e)} \right) \Delta u'_{i+} \right] + \min_t \left[ \left( -\sigma_s - \sigma_i^{(e)} \right) \Delta u'_{i-} \right] \right\} ds \leqslant 0.$$

Здесь $a=1$, $b=0$, если из трех компонентов приращений деформации $(\Delta\varepsilon_\varphi, \Delta\varepsilon_\theta, \Delta\varepsilon_z)$ два неотрицательны; $a=0$, $b=1$, если из трех компонентов приращения деформации $(\Delta\varepsilon_\varphi, \Delta\varepsilon_\theta, \Delta\varepsilon_z)$ два отрицательны; индекс $i$ принимает значения $\varphi$, $\theta$, $z$; индекс $j$ принимает значения $\varphi$, $\theta$, $z$, не совпадающие со значениями $i$ в каждой сумме (поэтому при вычислении каждой суммы индекс $j$ может принимать только одно значение); $\Delta u'_i$ — компонент разрыва приращений перемещений на поверхности $s_\mu$ (в направлениях $\varphi$, или $\theta$, или $z$);

$$\Delta\varepsilon_{i+} = \begin{cases} \Delta\varepsilon_i, & \text{если } \Delta\varepsilon_i > 0, \text{ при этом } i^+ = i; \\ 0, & \text{если } \Delta\varepsilon_i \leqslant 0, \text{ при этом } i^+ = i; \end{cases}$$

$$\Delta\varepsilon_{i-} = \begin{cases} 0, & \text{если } \Delta\varepsilon_i \geqslant 0; \\ \Delta\varepsilon_i, & \text{если } \Delta\varepsilon_i < 0; \text{ при этом } i^- = i. \end{cases}$$

$$\Delta u'_{i+} = \begin{cases} \Delta u'_i & \text{при } \Delta u'_i > 0; \\ 0 & \text{при } \Delta u'_i \leqslant 0; \end{cases}$$

$$\Delta u'_{i-} = \begin{cases} 0 & \text{при } \Delta u'_i \geqslant 0; \\ \Delta u'_i & \text{при } \Delta u'_i < 0. \end{cases}$$

Не изменяющиеся во времени объемные (собственная масса, инерционные силы $X_i$) или поверхностные (распределенные на поверхностях $s_p$) внешние нагрузки $p_i$ учитываются дополнительными слагаемыми в правой части неравенства, определяющего условия существования формоизменения:

$$\int_V X_i \Delta u_i dV + \int_{s_p} p_i \Delta u_i ds.$$

При этом условные упругие напряжения, входящие в левую часть указанного неравенства, вычисляются только от изменяющихся во времени внешних воздействий.

5.6.6. Расчет параметров предельного цикла с помощью пп. 5.6.2 и 5.6.3 сводится к отысканию такого распределения остаточных напряжений, при котором параметры нагрузки или температуры будут иметь максимальные значения при выполнении соответствующих ограничений, указанных в п. 5.6.2 (статический метод расчета). Расчет параметров предельного цикла с помощью п. 5.6.5 сводится к минимизации параметров нагрузки (температуры) по приращениям деформаций, удовлетворяющих ограничениям, указанным в п. 5.6.5 (кинематический метод расчета).

В общем случае указанные вычислительные задачи решаются методами математической теории оптимальных процессов, а при замене дифференциальных уравнений равновесия (или совместности деформаций) системой линейных алгебраических уравнений — методами линейного программирования с использованием соответствующих стандартных или специальных подпрограмм для ЭВМ.

5.6.7. Приближенные нижние оценки параметров предельного цикла (т. е. значения, меньшие или равные параметрам предельного цикла) получают, задавая какие-либо удовлетворяющие условиям равновесия распределения остаточных напряжений и вычисляя максимальные значения нагрузок и температур, при которых приведенные напряжения (отвечают сумме остаточных и условных упругих напряжений) не превышают $\sigma_s$.

Например, можно принять, что остаточные напряжения во всех точках конструкции пропорциональны термоупругим напряжениям в один из моментов времени цикла (такое распределение удовлетворяет условиям равновесия при нулевых внешних нагрузках) или что некоторые компоненты остаточных напряжений ($\rho_\varphi$ или $\rho_\theta$ или $\rho_z$) пропорциональны минимальным за цикл разностям между $\sigma_s$ и соответствующими упругими напряжениями $\left(\sigma_\varphi^{(e)}, \sigma_\theta^{(e)}, \sigma_z^{(e)}\right)$. В последнем случае остальные компоненты остаточных напряжений находятся из условий равновесия и затем вычисляется соответствующая нижняя оценка параметров предельного цикла.

5.6.8. Приближенные верхние оценки для параметров предельного цикла могут быть получены при использовании кинематических методов, т. е. методов, опирающихся на кинематическую теорему (п. 5.6.5). Преимуществом этих методов является четкое кинематическое представление о характере возникающей циклической пластической деформации, ее механизме. Они используются лишь для определения условий прогрессирующего формоизменения, поскольку знакопеременное течение носит локальный характер и соответствующее предельное условие определяется на основании указанного выше приближенного критерия (изменение упругих напряжений в точке конструкции превышает $2\sigma_s$).

В основе приближенного кинематического метода лежит предположение о возможном (удовлетворяющем условиям совместности деформаций) распределении приращений пластической деформации за цикл. Обычно удобно такое распределение (механизм разрушения) находить, задавая некоторое распределение приращений остаточных перемещений в точках конструкции, и тогда приращения деформаций могут быть вычислены с помощью известных соотношений (типа соотношения Коши). При этом иногда могут быть использованы результаты решения аналогичных задач предельного равновесия, поскольку механизмы «мгновенного» и прогрессирующего разрушений в общем однотипны, отличие состоит в их реализации («мгновенно» в условиях предельного равновесия и поэтапно в течение цикла при прогрессирующем формоизменении).

Наиболее просто использовать приближенные кинематические методы в осесимметричных задачах, поскольку распределения приращений перемещений здесь часто могут быть представлены в виде функций одной координаты (диск, круглая пластина, труба), иногда с применением дополнительных параметров, которые определяются в ходе решения путем минимизации искомых нагрузок. В задачах этого типа иногда удается с помощью элементарного метода получить точные решения, удовлетворяющие не только кинематическим (реализация некоторого механизма прогрессирующего формоизменения), но и статическим (отсутствие точек, в которых напряжения в течение цикла превышали бы $\sigma_s$) условиям.

При заданном (принятом) механизме разрушения параметры предельного цикла при использовании кинематического метода определяются с помощью неравенства типа приведенного в п. 5.6.5, в необходимых случаях дополненного членами, учитывающими постоянные внешние нагрузки.

Другой вариант кинематического метода (так называемый метод догрузки) позволяет применить условия равновесия, записанные в обычной форме; для этого предварительно

должна быть использована связь между приращениями пластической деформации за цикл и действующими напряжениями (напряжения, вызывающие соответствующую пластическую деформацию, должны достигать предела текучести, при этом вектор деформации должен быть перпендикулярен соответствующей грани шестиугольника, определяющего условия текучести при использовании критерия максимальных касательных напряжений).

5.7. На втором этапе рекомендуется рассчитывать кинетику упругопластического деформирования, если прекращение прогрессирующего формоизменения по данным первого этапа невозможно и необходимо обосновать возможность работы конструкции за пределами приспособляемости.

При этом проверяют, не приведет ли прогрессирующее формоизменение или комбинация его со знакопеременным пластическим течением (знакопеременное пластическое течение характеризуется тем, что приращение пластической деформации за цикл равно нулю) к нарушению нормальных условий эксплуатации конструкции в течение заданного срока службы. С этой целью найденные из расчета значения деформаций сопоставляют с допускаемыми, установленными на основании эксплуатационных требований.

При расчете деформаций необходимо учитывать изменение механических характеристик материала вследствие знакопеременного пластического течения (в том числе ускорение ползучести вследствие предшествующей пластической деформации противоположного знака, нейтронного облучения, структурных превращений, влияния поверхностно-активных сред).

В тех случаях, когда проверка на прогрессирующее формоизменение конструкции расчетным путем затруднительна, рекомендуются натурные испытания или испытания на моделях.

5.8. В частных случаях для конструкционных элементов типа стержней с сечением в виде круга или правильного многоугольника, толстостенных и тонкостенных труб постоянной толщины с аналогичными сечениями, свободных пластин постоянной толщины, изготовленных из материалов, указанных в табл. П4.1 и работающих при теплосменах в пароводяной среде или в натрии при максимальных температурах, не превышающих указанные в табл. П4.1 значения $T_{\Phi}$, накопленная деформация за цикл не превышает значений $\Delta\varepsilon = 2 \cdot 10^{-4}\%$ в зонах, где краевой эффект практически не влияет на значение напряжений.

Если для данного конструкционного элемента деформация, накопленная за ресурс, является допустимой, дальнейшие расчеты на формоизменение могут не проводиться. Этот вывод справедлив при следующих условиях:

Таблица П4.1. **Значения характеристик формоизменения при теплосменах и нейтронном облучении в различных средах**

| Основной металл и равнопрочные сварные соединения | Состояние | $T_ф$, К (°С) | | | $\gamma_r$, см²/(нейтр.·с) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Пароводяная среда | Натрий, $T_{min}$ = 473 К (200° С) | Натрий, $T_{min}$ = 673 К (400° С) | |
| 08Х16Н11М3 | Аустенизация | 773 (500) | 803 (530) | 823 (550) | $4{,}6 \cdot 10^{-50}$ |
| 12Х18Н9<br>12Х18Н10Т | » | 773 (500) | 803 (530) | 823 (550) | $7{,}6 \cdot 10^{-50}$ |
| 08Х16Н11М3<br>12Х18Н9<br>12Х18Н10Т | Наклеп 15% + стабилизация | 823 (550) | 853 (580) | 853 (580) | |
| ХН35ВТ | Аустенизация + старение | 873 (600) | 873 (600) | 873 (600) | $5{,}0 \cdot 10^{-51}$ |
| 1Х16Н36-МБТЮР | Аустенизация + стабилизация | | | | |
| 10Х2М<br>12Х2М1ФБ | Нормализация + отпуск | 793 (520) | 823 (550) | 833 (560) | — |
| 15Х2МФА<br>15Х2НМФА | Закалка + отпуск | 793 (520) | — | — | 0 |

а) напряжения от механических нагрузок несущественны

$$(\sigma)_1 \leqslant 0{,}1\,[\sigma];\ (\sigma)_2 \leqslant 0{,}13\,[\sigma];$$

б) температура среды, омывающей конструкцию, изменяется во всем объеме настолько быстро, что градиенты во всех сечениях деталей цилиндрической формы (соответственно для всех нормалей к пластинке) оказываются одинаковыми; градиенты температур в осевом направлении (для деталей цилиндрической формы) или вдоль поверхности (для пластинки) таковы, что соответствующие термоупругие напряжения составляют не более $0{,}1\sigma_s$;

в) отсутствуют условия, которые смогли бы привести к изгибной деформации, т. е. начальная форма деталей и температурные поля строго симметричны относительно продольных осей (или срединной плоскости — для пластины); в деталях нет начальных технологических напряжений, релаксация которых привела бы к изгибу; отсутствует опасность коробления в связи с тонкостенностью.

Для перечисленных выше конструкционных элементов при максимальных температурах цикла, превышающих значения $T_ф$, указанные в табл. П4.1, но не более 923 К (650° С), а также для стержней и труб, имеющих регулярные продольные ребра, выточки или кольцевые выточки с геометрическими параметрами $h_1/H \leqslant 0{,}1$, $\rho \leqslant h_1/2$ при числе ребер или выточек не более 10 и $T_{max} \leqslant 923$ К (650° С), верхняя оценка накопленной за один цикл деформации $\Delta\varepsilon$ (продольной или поперечной без учета изгиба) может быть найдена с помощью приближенной эмпирической зависимости

$$\Delta\varepsilon = 10^{[0{,}01(T_{max} - T_*) - 5{,}4]},$$

где $T_* = T_ф + \Delta T_0(1 - 10^{-H/d_0}) - \Delta T_в \varkappa$ — температура приспособляемости по допуску $2 \cdot 10^{-4}$ %/цикл; $\Delta T_0 = 50$ К (50° С) для стержней и толстостенных труб; $\Delta T_0 = 0$ К (0° С) для пластин и тонкостенных труб (оболочек); $H$ — толщина трубы, мм; $d_0$ — минимальный внутренний диаметр трубы (для сплошных стержней $d_0 = 0$), мм; $\Delta T_в = -5$ К ($-5$° С); $\varkappa$ — число ребер или выточек; $h_1$ — глубина выточек или высота ребра, мм; $\rho$ — радиус закругления выточек, мм; $T_{max}$ — максимальная температура теплосмен, К (°С).

При нестационарных режимах теплосмен величина необратимого формоизменения определяется линейным суммированием.

## 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

6.1. Данный пример иллюстрирует порядок проведения расчета на прогрессирующее формоизменение. В примере условно выбраны характеристики конструкции и параметры нагружения (в частности, задан простейший — линейный закон распределения температуры).

6.2. Рассчитываем участок длинной цилиндрической оболочки (рис. П4.1), расположенный вдали от ее краев. Оболочка подвергается действию внутреннего давления $p(t)$ (не изменяющегося по ее длине) и температуры $T(t)$, изменяющейся по линейному закону по толщине оболочки в каждый момент времени $t$:

$$T(t) = T_0(t) + \frac{z}{h} T_1(t).$$

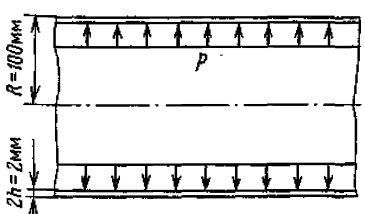



Рис. П4.1. Участок длинной цилиндрической оболочки, расположенный вдали от ее краев

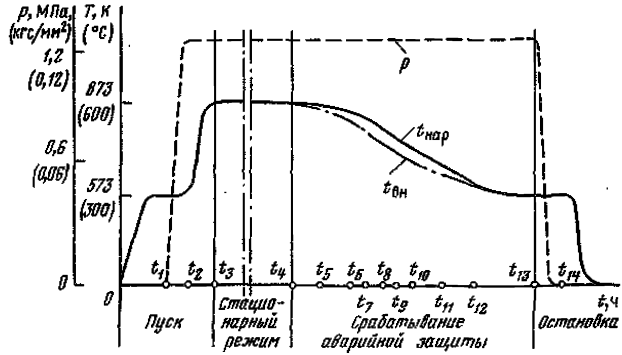



Рис. П4.2. Изменение давления и температуры в течение рабочего цикла

Здесь $T_0(t)$ — температура срединной поверхности; $T_1(t)$ — разность температур наружной и срединной поверхностей оболочки.

Целью расчета является проверка допустимости заданного внутреннего давления и температур оболочки с точки зрения прогрессирующего формоизменения.

6.3. Размеры оболочки приведены на рис. П4.1. Изменение давления и температуры в течение рабочего цикла иллюстрирует рис. П4.2. В стационарном режиме в процессах пуска и остановки температуры наружной и внутренней поверхностей оболочки $T_н$ и $T_в$ принимаются одинаковыми. Значения $T_0(t)$, $T_1(t)$ и $p(t)$ для ряда моментов времени, указанных на рис. П4.2, приведены в табл. П4.2.

Механические характеристики материала оболочки даны в табл. П4.3. При температуре 293 К (20° С) модуль упругости $E=2{,}0\cdot10^5$ МПа ($2{,}0\cdot10^4$ кгс/мм$^2$), температурный коэффициент линейного расширения $\alpha=17$ мкК$^{-1}$ ($17{,}0\cdot10^{-6}$ 1/° С) и коэффициент Пуассона $\mu=0{,}3$. Расчетный срок службы оболочки 100 000 ч.

6.4. Определяем предельные напряжения $\sigma_s$:

а) для стационарного режима работы в соответствии с разд. 3.2.

$$\sigma_s=\min\{R^T_{p0,2}/n_{0,2};\ R^T_{mt}/n_{mt}\}=$$

$$=\min\{120/1{,}5;\ 125/1{,}5\}=80{,}0\ \text{МПа}\ \ (8{,}0\ \text{кгс/мм}^2);$$

Таблица П4.2. **Параметры нагружения**

| | $t$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_0$, | К (°С) | 573 (300) | 573 (300) | 873 (600) | 873 (600) | 856 (583) | 867,5 (594,5) | 794 (521) |
| $T_1$, | К (°С) | 273 (0) | 273 (0) | 273 (0) | 273 (0) | 277,5 (4,50) | 284,25 (11,25) | 289,56 (16,56) |
| $p$, | МПа (кгс/мм$^2$) | 0 0 | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) |

| | $t$ | $t_8$ | $t_9$ | $t_{10}$ | $t_{11}$ | $t_{12}$ | $t_{13}$ | $t_{14}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_0$, | К (°С) | 765,5 (492,5) | 734 (461) | 709 (436) | 667 (394) | 639 (366) | 573 (300) | 573 (300) |
| $T_1$, | К (°С) | 292,55 (19,55) | 293 (20,00) | 289,56 (16,56) | 285 (12,00) | 281,75 (8,75) | 273 (0) | 273 (0) |
| $p$, | МПа (кгс/мм$^2$) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 1,2 (0,12) | 0 0 |

Таблица П4.3. **Механические характеристики материала оболочки**

| $T$, | К (°С) | 293 (20) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R^T_{p0,2}$ | МПа (кгс/мм$^2$) | 210 (21) | 150 (15) | 150 (15) | 140 (14) | 140 (14) | 130 (13) | 120 (12) | 120 (12) |
| $R_{1/100000}$, | МПа (кгс/мм$^2$) | — | — | — | — | 181 (18,1) | 169 (16,9) | 137 (13,7) | 100 (10,0) |

б) для режимов пуска, срабатывания аварийной защиты и остановки найденные согласно разд. 3.1 предельные напряжения

$$\sigma_s = \left(R^T_{p0,2}/1{,}5\right)$$

приведены в зависимости от температуры в табл. П 4.4.

6.5. Определяем условные упругие напряжения в рабочем цикле. Кольцевые напряжения от внутреннего давления $\sigma_{\theta p}$ при $p = 1{,}2$ МПа (0,12 кгс/мм$^2$) (см. рис. П4.2) равны 60 МПа (6 кгс/мм$^2$), осевые напряжения от механической нагрузки равны нулю.

Таблица П4.4. **Предельные напряжения**

| $T$, К (°С) | 293 (20) | 573 (300) | 623 (350) | 673 (400) |
|---|---|---|---|---|
| $\sigma_s$, МПа (кгс/мм$^2$) | 140,0 (14,00) | 100,0 (10,00) | 100,0 (10,00) | 93,3 (9,33) |

| $T$, К (°С) | 723 (450) | 773 (500) | 823 (550) | 873 (600) |
|---|---|---|---|---|
| $\sigma_s$, МПа (кгс/мм$^2$) | 93,3 (9,33) | 86,7 (8,67) | 80,0 (8,00) | 80,0 (8,00) |

Таблица П.4.5. **Термоупругие напряжения**

| $t$ | $t_4$ | $t_5$ | $t_6$ | $t_7$ | $t_8$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{\theta T}=\sigma_{\varphi T}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 0 (0) | 21.8 (2,18) | 54,6 (5,46) | 80,4 (8,04) | 95,0 (9,50) |

| $t$ | $t_9$ | $t_{10}$ | $t_{11}$ | $t_{12}$ | $t_{13}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{\theta T}=\sigma_{\varphi T}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 97,1 (9,71) | 80,4 (8.04) | 58,3 (5,83) | 42,5 (4,25) | 0 (0) |

Термоупругие напряжения при линейном распределении температуры по толщине стенки находим по формуле

$$\sigma_{\theta T}=\sigma_{\varphi T}=-\frac{\alpha E T_1(t)}{(1-\mu)}\frac{z}{h}.$$

Здесь $\sigma_{\theta T}$, $\sigma_{\varphi T}$ — кольцевые и осевые термоупругие напряжения; координата $z$ отсчитывается от срединной поверхности оболочки по нормали к ней; $z=h$ на наружной поверхности оболочки и $z=-h$ на внутренней поверхности.

В стационарном режиме, при пуске и остановке термоупругие напряжения равны нулю [поскольку $T_1(t)=0$]. Значения напряжений $\sigma_{\theta T}=\sigma_{\varphi T}$ для ряда моментов времени режима срабатывания аварийной защиты приведены в табл. П4.5 для точек, лежащих на внутренней ($z=-h$) поверхности оболочки.

6.6. Сопоставляем приведенные условные упругие напряжения с предельными напряжениями. Приведенные условные упругие напряжения подсчитываем согласно критерию наибольших касательных напряжений:

$$(\sigma)^{(e)}=\max\left(|\sigma_\varphi^{(e)}|,\ |\sigma_\theta^{(e)}|,\ |\sigma_\varphi^{(e)}-\sigma_\theta^{(e)}|\right),$$

где $\sigma_\theta^{(e)}=\sigma_{\theta p}+\sigma_{\theta T}$; $\sigma_\varphi^{(e)}=\sigma_{\varphi p}+\sigma_{\varphi T}=\sigma_{\varphi T}$.

В момент времени $t_9$ на внутренней поверхности оболочки $(\sigma)^{(e)} = 60{,}0 + 97{,}1 = 157{,}1$ МПа (15,71 кгс/мм$^2$). Температура точек внутренней поверхности оболочки в этот момент, определенная по данным табл. П4.1, составляет 714 К (441° С); соответствующее предельное напряжение $\sigma_s$, найденное по данным табл. П4.3 с помощью линейной интерполяции, составляет 93,3 МПа (9,33 кгс/мм$^2$). Таким образом, приведенное напряжение $(\sigma)^{(e)}$ превышает предельное. Сопоставления приведенных напряжений с предельными в других точках оболочки и в другие моменты времени проводить не нужно, поскольку полученный выше результат требует перехода к следующему этапу расчета: проверка, может ли пластическая деформация прекратиться за счет перераспределения напряжений по толщине оболочки.

6.7. Определяем экстремальные значения разностей предельных и условных упругих напряжений. Чтобы проверить, выполняются ли неравенства, записанные в п. 5.5а, вычисляем величины

$$\min_t\left(\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right), \quad \min_t\left(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right),$$

$$\max_t\left(-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right), \quad \max_t\left(-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right).$$

Таблица П4.6. **Разности предельных и условных упругих напряжений**

| Режим | Пуск | | |
|---|---|---|---|
| $t$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |
| $T$, К (°С) | 573 (300) | 573 (300) | 873 (600) |
| $\sigma_s$, МПа, (кгс/мм$^2$) | 100 (10) | 100 (10) | 80 (8) |
| $\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 100 (10) | 100 (10) | 80 (8) |
| $-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | −100 (−10) | −100 (−10) | −80 (−8) |
| $\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 100 (10) | 40 (4) | 20 (2) |
| $-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | −100 (−10) | −160 (−16) | −140 (−14) |

| Режим | Стационарный | Остановка | |
|---|---|---|---|
| $t$ | $t_4$ | $t_{13}$ | $t_{14}$ |
| $T$, К (°С) | 873 (600) | 573 (300) | 573 (300) |
| $\sigma_s$, МПа, (кгс/мм$^2$) | 80 (8) | 100 (10) | 100 (10) |
| $\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 80 (8) | 100 (10) | 100 (10) |
| $-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | −80 (−8) | −100 (−10) | −100 (−10) |
| $\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 20 (2) | 40 (4) | 100 (10) |
| $-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | −140 (−14) | −16 (−160) | −100 (−10) |

Значения стоящих в скобках величин для стационарного режима и ряда моментов времени режимов пуска и остановки [тех, в которые $T_1(t)=0$] приведены в табл. П 4.6. По толщине оболочки эти значения не изменяются для указанных режимов. Экстремальные для данных режимов значения рассматриваемых величин обведены рамками [нетрудно убедиться, что при $T_1(t)=0$ в моменты времени, не указанные в табл. П 4.6, экстремальные значения не достигаются].

Далее отыскиваем разности предельных и условных упругих напряжений для ряда моментов режима срабатывания аварийной защиты ($T_1(t)\neq 0$). Для определения экстремальных значений этих разностей достаточно рассмотреть моменты времени $t_9$, $t_8$, $t_7$, $t_4$, причем условные упругие и предельные напряжения в момент $t_4$ совпадают с соответствующими значениями в момент $t_3$ (см. табл. П4.6). В моменты времени $t_{10}$, $t_{11}$ и $t_{12}$ условные упругие напряжения падают, а предельные напряжения возрастают по сравнению с $t_9$ (см. табл. П4.1, П4.3 и П4.4), поэтому указанные моменты времени не рассматриваем. Результаты расчета приведены в табл. П4.6.

Для сохранения общности методики в табл. П4.6 учтена температурная зависимость предельных напряжений $\sigma_s$. Ввиду малости перепадов температуры по толщине в данном примере эта зависимость слабо влияет на результаты расчета, однако в других задачах (в частности, при параболических законах распределения температуры) она оказывается иногда существенной.

Расчет разностей предельных и упругих напряжений для ряда моментов времени иллюстрируют рис. П4.3 и П4.4; жирными линиями выделены соответствующие минимальные (максимальные) за цикл значения.

Значения разностей предельных и условных упругих напряжений за весь рабочий цикл приведены в табл. П4.6 и П4.7, а экстремальные значения этих разностей — в табл. П4.8.

6.8. Выполнение условий отсутствия прогрессирующего формоизменения, приведенных в разд. 5.5а, проверяется численным интегрированием с использованием данных табл. П4.8:

$$\int_{-h}^{h} \min_t \left[\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right] dz = 121{,}6 \text{ Н/мм } (12{,}16 \text{ кгс/мм}) > 0;$$

$$\int_{-h}^{h} \max_t \left[-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right] dz = -116{,}2 \text{ Н/мм } (-11{,}62 \text{ кгс/мм}) < 0;$$

$$\int_{0}^{h} \min_t \left[(\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)})z\right] dz + \int_{-h}^{0} \min_t \left[(-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)})z\right] dz =$$

$$= 80 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм } (8 \text{ кгс} \cdot \text{мм/мм}) > 0;$$

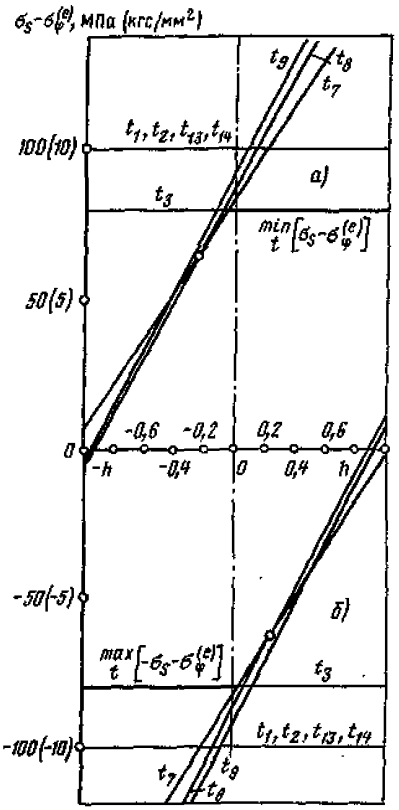



Рис. П4.3. Значения разностей напряжений в различные моменты времени для $\sigma_s-\sigma_\varphi^{(e)}$ (*а*) и $-\sigma_s-\sigma_\varphi^{(e)}$ (*б*)

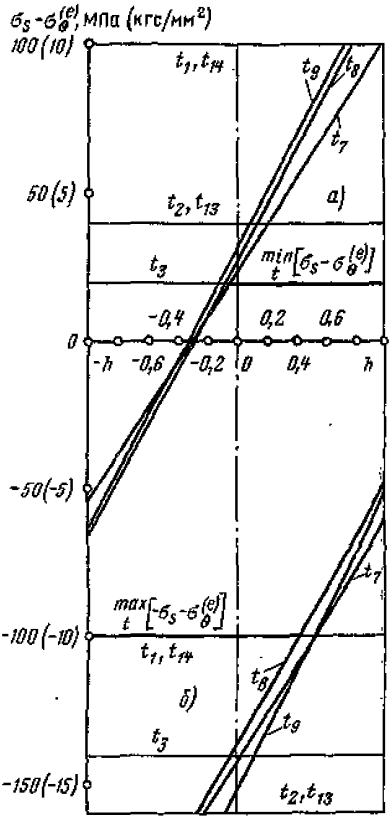



Рис. П4.4. Значения разностей напряжений в различные моменты времени для $\sigma_s-\sigma_\theta^{(e)}$ (*а*) и $-\sigma_s-\sigma_\theta^{(e)}$ (*б*)

$$\int_0^h \max_t \left[\left(-\sigma_s-\sigma_\varphi^{(e)}\right)z\right]dz+\int_{-h}^0 \max_t \left[\left(\sigma_s-\sigma_\varphi^{(e)}\right)z\right]dz=$$

$$=-25{,}6\ \text{Н}\cdot\text{мм/мм}\ \ (-2{,}56\ \text{кгс}\cdot\text{мм/мм})<0;$$

$$\int_{-h}^h \min_t \left[\sigma_s-\sigma_\theta^{(e)}\right]dz=0{,}9\ \text{Н/мм}\ \ (0{,}09\ \text{кгс/мм})>0;$$

$$\int_{-h}^h \max_t \left[-\sigma_s-\sigma_\theta^{(e)}\right]dz=-185{,}5\ \text{Н/мм}\ \ (-18{,}55\ \text{кгс/мм})<0;$$

$$\int_0^h \min_t \left[(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)})z\right] dz + \int_{-h}^0 \min_t \left[(-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)})z\right] dz =$$

$$= 60 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм} \quad (6 \text{ кгс} \cdot \text{мм/мм}) > 0;$$

$$\int_0^h \max_t \left[(-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)})z\right] dz + \int_{-h}^h \max_t \left[(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)})z\right] dz =$$

$$= -20{,}7 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм} \quad (-2{,}07 \text{ кгс} \cdot \text{мм/мм}) < 0.$$

В итоге приходим к выводу, что прогрессирующего формоизменения оболочки при заданных условиях работы не будет.

## 7. ДИАГРАММЫ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВЫХ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ

7.1. Формулы и диаграммы приспособляемости для цилиндрических и сферических оболочек, толстостенных сферических сосудов и круглых пластинок при повторных механических и тепловых воздействиях приведены ниже. Диаграммы построены для различных типов механических нагрузок (распределенных, сосредоточенных) и полей температуры (температура изменяется по толщине, вдоль образующей), различных программ изменения температуры и нагрузок во времени, а также различных условий закрепления оболочки или пластинки. При этом принималось $\sigma_s = \text{const}$ и $\mu = 0{,}3$.

**Основные обозначения:**

$T$—температура, К (°С);

$p$—давление, Па (кгс/мм$^2$);

$P$—сосредоточенная сила, Н (кгс);

$n$, $m$, $f$, $q$—параметры нагрузки;

$t_п$—параметры температуры;

$R$—радиус срединной поверхности оболочки (радиус пластинки), мм;

$$\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}/\sqrt{2Rh}.$$

Приведенные здесь формулы и диаграммы могут быть использованы в тех случаях, когда нагрузки, температуры и геометрические характеристики элемента конструкции соответствуют условиям, для которых приведены соответствующие графики и формулы.

Для использования формул и диаграмм следует вычислить параметры механических и тепловых воздействий $m$, $p$, $q$, $n$, $t_п$ для заданной конструкции и условий работы и сопоставить их значения с предельными, указанными на диаграмме или

Таблица П4.7. **Разности предельных и условных**

| | $z/h$ | $-1{,}0$ | $-0.8$ | $-0{,}6$ | $-0{,}4$ | $-0{,}2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_9$ | $T$, К (°С) | 714 (441) | 718 (445) | 722 (449) | 726 (453) | 730 (457) |
| | $\sigma_{sm}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 93,3 (9,33) | 93,3 (9.33) | 93,3 (9,33) | 92,6 (9,26) | 92,4 (9.24) |
| | $\sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 97,1 (9,71) | 77,7 (7.77) | 58,3 (5,83) | 38,8 (3,88) | 19,4 (1,94) |
| | $\sigma_z-\sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-3{,}8$ ($-0{,}38$) | 15,6 (1,56) | 35,0 (3,50) | 53,8 (5,38) | 73,0 (7,30) |
| | $-\sigma_z-\sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-190{,}4$ ($-19{,}04$) | $-171{,}0$ ($-17.10$) | $-151{,}6$ ($-15{,}16$) | $-131.4$ ($-13{,}14$) | $-111{,}8$ ($-11{,}18$) |
| | $\sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 157,1 (15,71) | 137.7 (13,77) | 118.3 (11,83) | 98,8 (9,88) | 79,4 (7,94) |
| | $\sigma_z-\sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-63{,}8$ ($-6{,}38$) | $-44.4$ ($-4{,}44$) | $-25{,}0$ ($-2{,}50$) | $-6{,}2$ ($-0{,}62$) | 13,0 (1,30) |
| | $-\sigma_z-\sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-250{,}4$ ($-25.04$) | $-231.0$ ($-23{,}10$) | $-211{,}6$ ($-21{,}16$) | $-191.4$ ($-19{,}14$) | $-171{,}8$ ($-17{,}18$) |
| $t_8$ | $T$, К (°С) | 746 (473) | 750 (477) | 754 (481) | 758 (485) | 762 (489) |
| | $\sigma_\varphi$, МПа (кгс/мм$^2$) | 90,3 (9,03) | 89,7 (8,97) | 89,2 (8,92) | 88,7 (8.87) | 88,2 (8,82) |
| | $\sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | 95,0 (9,50) | 76,0 (7,60) | 57,0 (5,70) | 38,0 (3,80) | 19.0 (1,90) |
| | $\sigma_z-\sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-4{,}7$ ($-0{,}47$) | 13,7 (1,37) | 32,2 (3,22) | 50,7 (5,07) | 69,2 (6,92) |
| | $-\sigma_z-\sigma_\varphi^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-185{,}3$ ($-18{,}53$) | $-165{,}7$ ($-16{,}57$) | $-146{,}2$ ($-14.62$) | $-126{,}7$ ($-12{,}67$) | $-107{,}2$ ($-10{,}72$) |
| | $\sigma_\theta^{(e)}$, МПа(кгс/мм$^2$) | 155,0 (15,55) | 136,0 (13.60) | 117,0 (11.70) | 98,0 (9,80) | 79,0 (7,90) |
| | $\sigma_z-\sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-64{,}7$ ($-6.47$) | $-46{,}3$ ($-4{,}63$) | $-27.8$ ($-2{,}78$) | $-9{,}3$ ($-0.93$) | 9,2 (0,92) |
| | $-\sigma_z-\sigma_\theta^{(e)}$, МПа (кгс/мм$^2$) | $-245{,}3$ ($-24{,}53$) | $-225{,}3$ ($-22.53$) | $-266{,}2$ ($-26.62$) | $-186{,}7$ ($-18{,}67$) | $-167{,}2$ ($-16{,}72$) |

упругих напряжений в зависимости от $z/h$

| 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| 734<br>(461) | 738<br>(465) | 742<br>(469) | 746<br>(473) | 750<br>(477) | 754<br>(481) |
| 91,8<br>(9,18) | 91,3<br>(9,13) | 90,8<br>(9,08) | 90,3<br>(9,03) | 89,7<br>(8,97) | 89,2<br>(8,92) |
| 0<br>(0) | −19,4<br>(−1,94) | −38,8<br>(−3,88) | −58,3<br>(−5,83) | −77,7<br>(−7,77) | −97,1<br>(−9,71) |
| 91,8<br>(9,18) | 110,7<br>(11,07) | 129,6<br>(12,96) | 148,6<br>(14,86) | 167,4<br>(16,74) | 186,3<br>(18,63) |
| −91,8<br>(−9,18) | −71,9<br>(−7,19) | −52,0<br>(−5,20) | −32,0<br>(−3,20) | −12,0<br>(−1,20) | 7,9<br>(0,79) |
| 60,0<br>(6,00) | 40,6<br>(4,06) | 21,8<br>(2,18) | 1,7<br>(0,17) | −17,7<br>(−1,77) | −37,1<br>(−3,71) |
| 31,8<br>(3,18) | 50,7<br>(5,07) | 69,6<br>(6,96) | 88,6<br>(8,86) | 107,6<br>(10,76) | 126,3<br>(12,63) |
| −151,8<br>(−15,18) | −131,9<br>(−13,19) | −112,0<br>(−11,20) | −92,0<br>(−9,20) | −72,0<br>(−7,20) | −52,1<br>(−5,21) |
| 765,5<br>(492,5) | 769<br>(496) | 773<br>(500) | 777<br>(504) | 781<br>(508) | 785<br>(512) |
| 87,7<br>(8,77) | 87,2<br>(8,72) | 86,7<br>(8,67) | 86,2<br>(8,62) | 85,6<br>(8,56) | 85,1<br>(8,51) |
| 0<br>(0) | −19,0<br>(−1,90) | −38,0<br>(−3,80) | −57,0<br>(−5,70) | −76,0<br>(−7,60) | −95,0<br>(−9,50) |
| 87,7<br>(8,77) | 106,2<br>(10,62) | 124,7<br>(12,47) | 143,2<br>(14,32) | 161,6<br>(16,16) | 180,1<br>(18,01) |
| −87,7<br>(−8,77) | −68,2<br>(−6,82) | −48,7<br>(−4,87) | −29,2<br>(−2,92) | −9,6<br>(−0,96) | 9,9<br>(0,99) |
| 60,0<br>(6,00) | 41,0<br>(4,10) | 22,0<br>(2,20) | 3,0<br>(0,30) | 16,0<br>(1,60) | −35,0<br>(−3,50) |
| 27,7<br>(2,77) | 46,2<br>(4,62) | 64,7<br>(6,47) | 83,2<br>(8,32) | 101,6<br>(10,16) | 120,1<br>(12,01) |
| −147,7<br>(−14,77) | −128,2<br>(−12,82) | −108,7<br>(−10,87) | −89,2<br>(−8,92) | −69,6<br>(−6,96) | −50,1<br>(−5,01) |

| | z/h | −1,0 | −0,8 | −0,6 | −0,4 | −0,2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_1$ | $T$, K (°C) | 777 (504) | 781 (508) | 784 (511) | 787 (514) | 791 (518) |
| | $\sigma_{\varphi}$, МПа (кгс/мм²) | 86,2 (8,62) | 85,6 (8,56) | 85,2 (8,52) | 84,8 (8,48) | 84,3 (8,43) |
| | $\sigma_{\varphi}^{(e)}$, МПа (кгс/мм²) | 80,4 (8,04) | 64,3 (6,43) | 48,2 (4,82) | 32,2 (3,22) | 16,1 (1,61) |
| | $\sigma_s - \sigma_{\varphi}^{(e)}$, МПа (кгс/мм²) | 5,8 (0,58) | 21,3 (2,13) | 37,0 (3,70) | 52,6 (5,26) | 68,2 (6,82) |
| | $-\sigma_s - \sigma_{\varphi}^{(e)}$, МПа (кгс/мм²) | −166,6 (−16,66) | −149,9 (−14,99) | −133,4 (−13,34) | −117,0 (−11,70) | −100,4 (−10,04) |
| | $\sigma_{\theta}^{(e)}$, МПа (кгс/мм²) | 140,4 (14,04) | 124,3 (12,43) | 108,2 (10,82) | 92,2 (9,22) | 76,1 (7,61) |
| | $\sigma_s - \sigma_{\theta}^{(e)}$, МПа (кгс/мм²) | −54,2 (−5,42) | −38,7 (−3,87) | −23,0 (−2,30) | −7,4 (−0,74) | 8,2 (0,82) |
| | $-\sigma_s - \sigma_{\theta}^{(e)}$, МПа (кгс/мм²) | −226,6 (−22,66) | −209,9 (−20,99) | −193,4 (−19,34) | −167,0 (−16,70) | −160,4 (−16,04) |

Таблица П4.8. **Экстремальные**

| z/h | −1,0 | −0,8 | −0,6 | −0,4 |
|---|---|---|---|---|
| $\min_t [\sigma_s - \sigma_{\varphi}^{(e)}]$, МПа (кгс/мм²) | −4,7 (−0,47) | 13,7 (1,37) | 32,2 (3,22) | 50,7 (5,07) |
| $\max_t [-\sigma_s - \sigma_{\varphi}^{(e)}]$, МПа (кгс/мм²) | −80,0 (−8,00) | −80,0 (−8,00) | −80,0 (−8,00) | −80,0 (−8,00) |
| $\min_t [\sigma_s - \sigma_{\theta}^{(e)}]$, МПа (кгс/мм²) | −64,7 (−6,47) | −46,3 (−4,63) | −27,8 (−2,78) | −9,3 (−0,93) |
| $\max_t [-\sigma_s - \sigma_{\theta}^{(e)}]$, МПа (кгс/мм²) | −100,0 (−10,00) | −100,0 (−10,00) | −100,0 (−10,00) | −100,0 (−10,00) |

| 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| 794<br>(521) | 797<br>(524) | 801<br>(528) | 804<br>(531) | 807<br>(534) | 811<br>(538) |
| 83,9<br>(8,39) | 83,5<br>(8,35) | 82,9<br>(8,29) | 82,5<br>(8,25) | 82,1<br>(8,21) | 81,6<br>(8,16) |
| 0<br>(0) | −16,1<br>(−1,61) | −36,6<br>(−3,66) | −48,2<br>(−4,82) | −64,3<br>(−6,43) | −80,4<br>(−8,04) |
| 89,3<br>(8,93) | 99,6<br>(9,96) | 115,1<br>(11,51) | 130,7<br>(13,07) | 146,4<br>(14,64) | 162,0<br>(16,20) |
| −83,9<br>(−8,39) | −67,4<br>(−6,74) | −50,7<br>(−5,07) | −34,3<br>(−3,43) | −17,8<br>(−1,78) | −1,2<br>(−0,12) |
| 60,0<br>(6,00) | 43,9<br>(4,39) | 27,8<br>(2,78) | 11,8<br>(1,18) | −4,3<br>(−0,43) | −20,4<br>(−2,04) |
| 23,9<br>(2,39) | 39,6<br>(3,96) | 55,1<br>(5,51) | 70,7<br>(7,07) | 86,4<br>(8,64) | 102,0<br>(10,20) |
| −143,9<br>(−14,39) | −127,4<br>(−12,74) | −110,7<br>(−11,07) | −94,3<br>(−9,43) | −77,8<br>(−7,78) | −61,2<br>(−6,12) |

значения разностей напряжений

| −0,2 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 68,2<br>(6,82) | 80,0<br>(8,00) | 80,0<br>(8,00) | 80,0<br>(8,00) | 80,0<br>(8,00) | 80,0<br>(8,00) | 80,0<br>(8,00) |
| −80,0<br>(−8,00) | −80,0<br>(−8,00) | −67,4<br>(−6,74) | −48,7<br>(−4,87) | −29,2<br>(−2,92) | −9,6<br>(−0,96) | 9,9<br>(0,99) |
| 8,2<br>(0,82) | 20,0<br>(2,00) | 20,0<br>(2,00) | 20,0<br>(2,00) | 20,0<br>(2,00) | 20,0<br>(2,00) | 20,0<br>(2,00) |
| −100,0<br>(−10,00) | −100,0<br>(−10,00) | −100,0<br>(−10,00) | −100,0<br>(−10,00) | −89,2<br>(−8,92) | −69,6<br>(−6,96) | −50,1<br>(−5,01) |

вычисленными с помощью приведенной здесь формулы. Конструкция приспособится к заданным внешним воздействиям, если параметры нагрузок и температура, отвечающие заданным условиям работы, не превышают предельных значений.

При использовании приведенных ниже формул и диаграмм расчеты условий формоизменения по разд. 5 не проводятся.

7.2. Цилиндрические сосуды и трубопроводы нагружены постоянно действующим давлением и циклически изменяющейся температурой (вдоль оси давление и температура не изменяются), ползучесть материала отсутствует. Предельные значения размахов температурных напряжений определяются из следующих соотношений:

а) при линейном изменении температуры по толщине

$$\frac{[(\sigma)_{RK}]}{R^T_{p0,2}} < \frac{R^T_{p0,2}}{(\sigma)_m} \text{ для } 0 < \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} \leqslant 0{,}5;$$

$$\frac{[(\sigma)_{RK}]}{R^T_{p0,2}} < 4\left(1 - \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}}\right) \text{ для } 0{,}5 < \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} < 1;$$

б) при параболическом постоянном увеличении или уменьшении температуры по толщине стенки

$$\frac{[(\sigma)_{RK}]}{R^T_{p0,2}} < 5{,}2\left(1 - \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}}\right) \text{ при } 0{,}615 \leqslant \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} < 1;$$

если $\frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} < 0{,}615$, то

$$\frac{[(\sigma)_{RK}]}{R^T_{p0,2}} < 4{,}65 \quad \text{при} \quad \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} = 0{,}3;$$

$$\frac{[(\sigma)_{RK}]}{R^T_{p0,2}} < 3{,}55 \quad \text{при} \quad \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} = 0{,}4;$$

$$\frac{[(\sigma)_{RK}]}{R^T_{p0,2}} < 2{,}7 \quad \text{при} \quad \frac{(\sigma)_m}{R^T_{p0,2}} = 0{,}5.$$

Для промежуточных значений $(\sigma)_m/R^T_{p0,2}$ допускается линейная интерполяция.

7.3. Цилиндрическая труба (рис. П4.5) подвержена воздействию температурного фронта (рис. П4.6—П 4.8). Температурный фронт движется в любом направлении вдоль оси трубы. По толщине трубы температура не изменяется.

Повторные проходы температурного фронта, показанного на рис. П4.6, приводят к уменьшению диаметра трубы и увеличению ее длины при $\frac{\alpha E(T_1 - T_2)}{4\beta L_1 \sigma_s} \geqslant 0{,}92.$




Рис. П4.5. Участок цилиндрической трубы вдали от краев

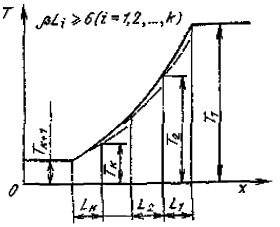



Рис. П4.6. Температурный фронт, приводящий к уменьшению диаметра трубы

Повторные проходы температурного фронта, показанного на рис. П4.7, приводят к увеличению диаметра трубы и уменьшению ее длины при $\frac{\alpha E(T_2-T_1)}{4\beta L_1\sigma_s}\geqslant 0{,}92$.

Если $\frac{\alpha E(T_2-T_1)}{4\beta L\sigma_s}\geqslant 0{,}92$, повторные проходы температурного фронта, показанного на рис. П4.8, делают поведение трубы неустойчивым. Изменение характера зависимости $T(x)$ или изменение предельного напряжения $\sigma_s$ ведет либо к увеличению, либо к уменьшению диаметра трубы после каждого прохода температурного фронта.

7.4. Цилиндрическая оболочка конечной длины (рис. П4.9) нагружена внутренним давлением и перепадом температуры по толщине стенки

$$0\leqslant p(t)\leqslant p^*;$$

$$T(t)=T_0(t)+\frac{z}{h}T_a(t),$$

где $T_0=\frac{1}{2}(T_2+T_1)$; $T_a=\frac{1}{2}(T_2-T_1)$; $-T\leqslant T_a(t)\leqslant T_1$; $-h\leqslant z\leqslant h$.

Параметры нагружения $t_n=E\alpha T/[(1-\mu)\sigma_s]$; $f=p^*R/[2h\sigma_s]$; $-t_n\leqslant t_n(t)\leqslant t_n$; $0\leqslant f(t)\leqslant f$.

Диаграммы приспособляемости цилиндрической оболочки конечной длины со свободными краями приведены на рис. П4.10, со свободно опертыми краями — на рис. П4.11, П4.12, с защемленными краями — на рис. П4.13 — П4.15.

7.5. Цилиндрическая оболочка (рис. П4.16) нагружена внутренним давлением и перепадом температуры по толщине стенки; на краю приложены краевые изгибающий момент $M(t)$ и перерезывающая сила $Q(t)$:

$$0\leqslant p(t)\leqslant p^*;\quad 0\leqslant M(t)\leqslant M;$$

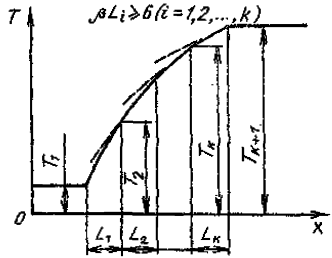



Рис. П4.7. Температурный фронт, приводящий к увеличению диаметра трубы

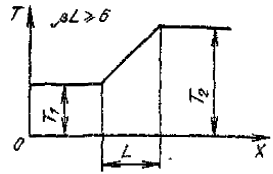



Рис. П4.8. Температурный фронт, вызывающий неустойчивое поведение трубы

$$0 \leqslant Q(t) \leqslant Q; \quad T(t) = T_0(t) + \frac{z}{h} T_a(t),$$

где $T_0 = \frac{1}{2}(T_2 + T_1)$; $T_a = \frac{1}{2}(T_2 - T_1)$; $-T \leqslant T_a(t) \leqslant T$; $-h \leqslant z \leqslant h$.

Параметры нагружения:

$$t_n = \frac{2\alpha ET}{(1-\mu)\sigma_s}; \quad f = \frac{p^* R}{2h\sigma_s}; \quad m = \frac{M}{\sigma_s h^2}; \quad q = \frac{Q\sqrt{2Rh}}{\sigma_s h^2 \sqrt{3(1-\mu^2)}}.$$

Диаграммы приспособляемости для края цилиндрической оболочки при различных значениях параметров $f$ и $t_n$ приведены на рис. П4.17—П4.20.

7.6. Длинная цилиндрическая оболочка (рис. П4.21) нагружена распределенным по круговому сечению усилием $P$ и перепадом температуры по толщине стенки:

$$P = \text{const}; \quad T(t) = T_0(t) + \frac{z}{h} T_a(t),$$

где $T_0 = \frac{1}{2}(T_2 + T_1)$; $T_a = \frac{1}{2}(T_2 - T_1)$; $-T \leqslant T_a(t) \leqslant T$; $-h \leqslant z \leqslant h$.

Параметры нагружения:

$$t_n = \frac{\alpha ET}{(1-\mu)\sigma_s}; \quad p = \frac{P\sqrt{Rh}}{4\sigma_s h^2 \sqrt{2}}.$$

Диаграммы приспособляемости приведены на рис. П4.22.

7.7. Замкнутая сферическая оболочка (рис. П4.23) нагружена внутренним давлением и перепадом температуры по толщине стенки:

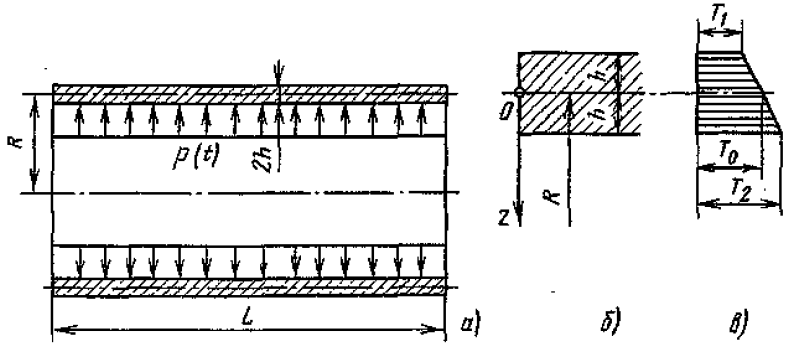



Рис. П4.9. Цилиндрическая оболочка конечной длины:
*а*—оболочка, нагруженная внутренним давлением; *б*—сечение оболочки; *в*—температурный перепад

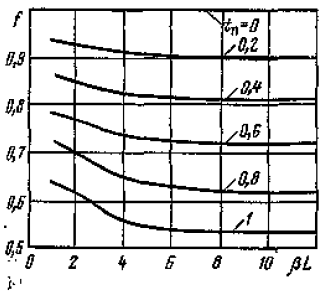



Рис. П4.10. Диаграммы приспособляемости для цилиндрической оболочки конечной длины со свободными краями

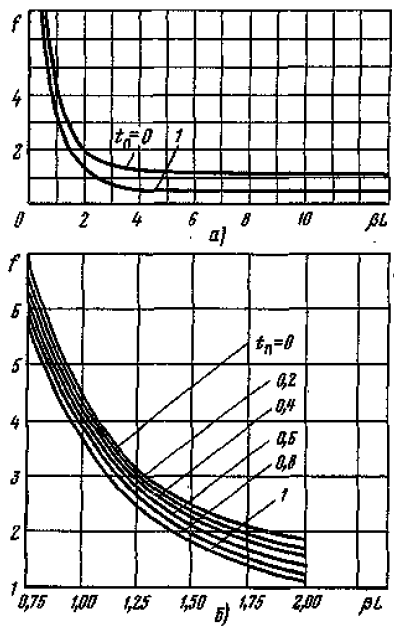



Рис. П4.11. Диаграммы приспособляемости для цилиндрической оболочки конечной длины со свободно опертыми краями:
*а*—общий вид диаграмм; *б*—для $\beta L = 0.75 \div 2{,}00$

$$0 \leqslant p(t) \leqslant p^*; \quad T(t) = T_0(t) + \frac{z}{h} T_a(t),$$

где $T_0 = \frac{1}{2}(T_2 + T_1)$; $T_a = \frac{1}{2}(T_2 - T_1)$; $-T \leqslant T_a(t) \leqslant T$; $-h \leqslant z \leqslant h$.

Параметры нагружения:

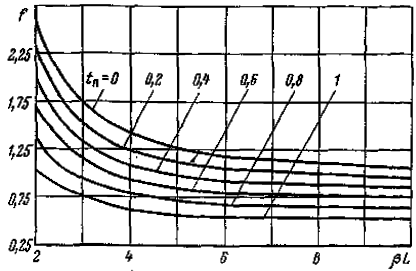



Рис. П4.12. Диаграммы приспособляемости для цилиндрической оболочки конечной длины со свободно опертыми краями

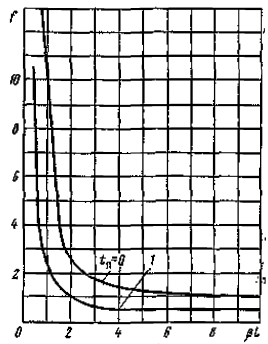



Рис. П4.13. Общий вид диаграмм приспособляемости для цилиндрической оболочки конечной длины с защемленными краями

$$f=p^*R/(4\sigma_s h);\quad t_n=\alpha ET/(1-\mu)\sigma_s.$$

Диаграммы приспособляемости для замкнутой сферической оболочки приведены на рис. П4.24.

7.8. Опертая сферическая оболочка (рис. П4.25) нагружена внутренним давлением и перепадом температуры по толщине стенки:

$$p^*=\text{const};\quad T(t)=T_0(t)+\frac{z}{h}T_a(t),$$

где $T_0=\frac{1}{2}(T_2+T_1);\quad T_a=\frac{1}{2}(T_2-T_1);\quad -T\leqslant T_a\leqslant T;\quad -h\leqslant z\leqslant h.$

Параметры нагружения:

$$f=p^*R/(4\sigma_s h);\quad t_n=E\alpha T/[2(1-\mu)\sigma_s].$$

На рис. П4.26 приведены диаграммы приспособляемости для опертой сферической оболочки ($2h/R=1/20$).

7.9. Защемленная сферическая оболочка (рис. П4.27) нагружена внутренним давлением и перепадом температуры по толщине стенки:

$$p^*=\text{const};\quad T(t)=T_0(t)+\frac{z}{h}T_a(t),$$

где $T_0=\frac{1}{2}(T_2+T_1);\quad T_a=\frac{1}{2}(T_2-T_1);\quad -T\leqslant T_a\leqslant T;\quad -h\leqslant z\leqslant h.$

Параметры нагружения и температурный перепад — см. разд. 7.8.

Рис. П4.14. Диаграммы приспособляемости для цилиндрической оболочки конечной длины с защемленными краями для $\beta L = 0{,}75 \div 2{,}00$ →

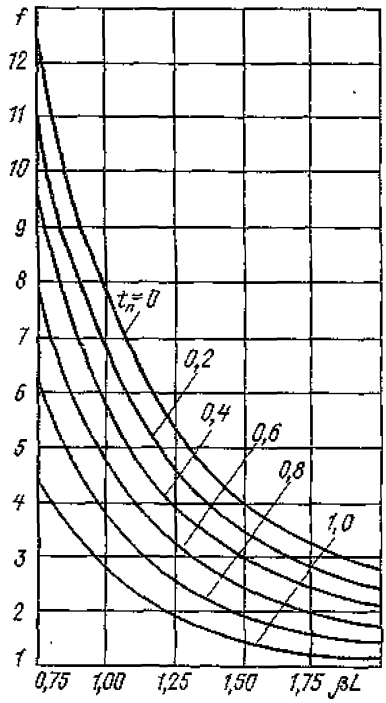



Рис. П4.15. Диаграммы приспособляемости для цилиндрической оболочки конечной длины с защемленными краями $\beta L = 2 \div 12$

Рис. П4.16. Край цилиндрической оболочки:
*а* — нагрузки на краю оболочки; *б* — сечение оболочки; *в* — температурный перепад

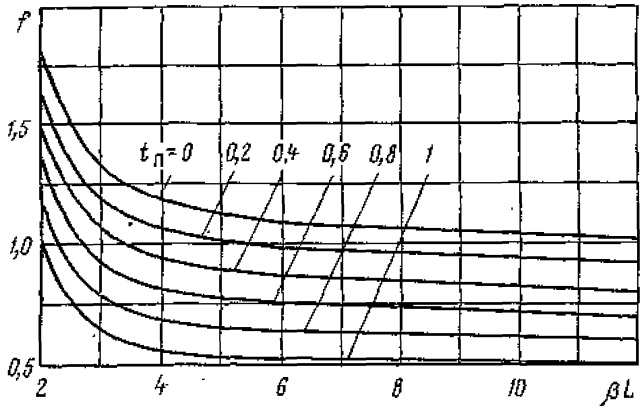



Рис. П4.15

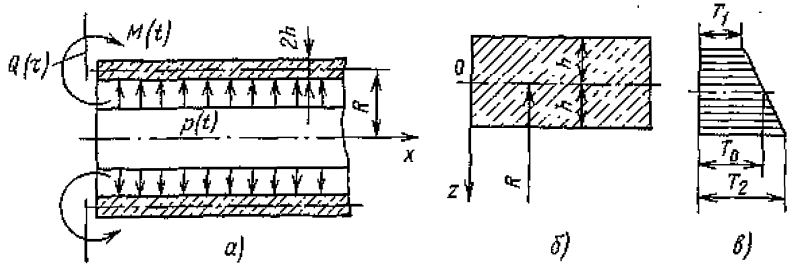



Рис. П4.16

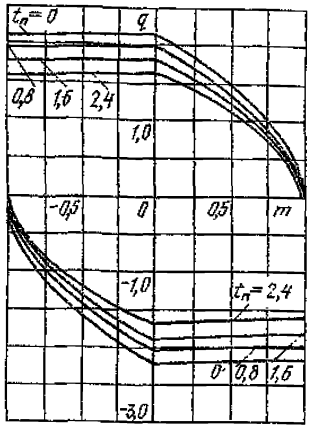



Рис. П4.17. Диаграммы приспособляемости для края цилиндрической оболочки при $f=0$

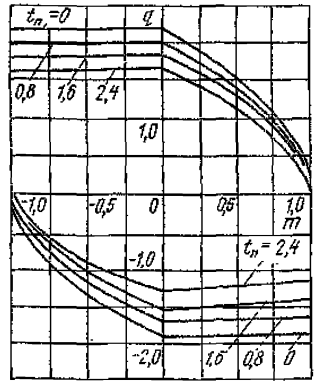



Рис. П4.18. Диаграммы приспособляемости для края цилиндрической оболочки $f=0,25$

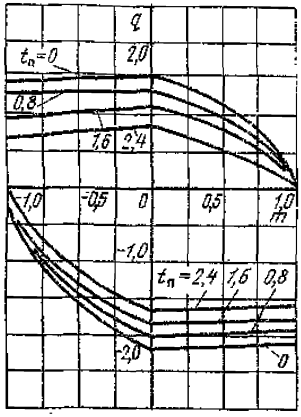



Рис. П4.19. Диаграммы приспособляемости для края цилиндрической оболочки $f=0,5$

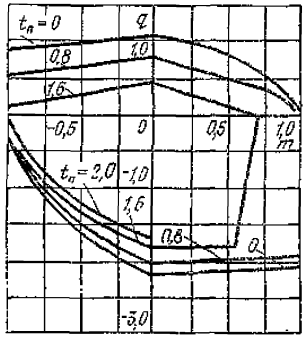



Рис. П4.20. Диаграммы приспособляемости для края цилиндрической оболочки $f=0,75$

На рис. П4.28 приведены диаграммы приспособляемости для защемленной сферической оболочки.

7.10. Толстостенный замкнутый сферический сосуд нагружен внутренним давлением $p^*=\text{const}$ и перепадом температуры по толщине стенки:

$$T(t,\ \rho)=T_b(t)+\Delta T(t)k\left(1-\rho\right)/\rho\left(1-k\right),$$

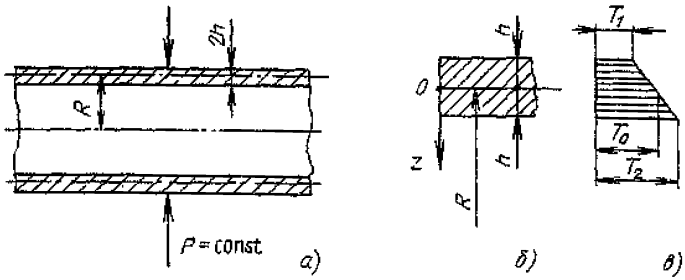



Рис. П4.21. Длинная цилиндрическая оболочка:
*а*—оболочка, нагруженная распределенным по круговому сечению усилием $P$; *б*—сечение оболочки; *в*—температурный перепад

где $\Delta T(t)=T_b(t)-T_a(t)$; $\Delta T^- \leqslant \Delta T(t) \leqslant \Delta T^+$; $\Delta T=\Delta T^+ - \Delta T^-$;

$$k=a/b; \quad \rho=r/b;$$

$T_b(t)$—температура на наружной поверхности, $T_a(t)$—температура на внутренней поверхности; $r$—текущий радиус; $b$—наружный радиус; $a$—внутренний радиус.

Параметры нагружения:

$$t_n=\alpha E\Delta T/[2(1-\mu)\sigma_s]; \quad f=p^*/\sigma_s.$$

На рис. П4.29 приведены диаграммы приспособляемости для сферического толстостенного сосуда для ряда значений $k$.

7.11. Круглая свободно опертая пластинка (рис. П4.30) нагружена равномерно распределенным давлением и температурным полем:

$$0 \leqslant p(t) \leqslant p^*; \quad T(t, z)=T_0(t)+T_1(t)\left[\frac{z}{h}+\frac{1}{2}\left(\frac{z}{h}\right)^2\right],$$

где $0 \leqslant T_1(t) \leqslant T_1$; $\min T_0 \leqslant T_0(t) \leqslant \max T_0$.

Параметры нагружения:

$$f=p^* R^2/(6\sigma_s h^2); \quad t_n=\alpha E T_1/[6(1-\mu)\sigma_s].$$

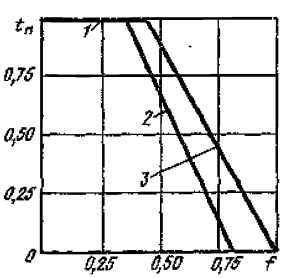



Рис. П4.22. Диаграммы приспособляемости для длинной цилиндрической оболочки, нагруженной распределенным по круговому сечению усилием и перепадом температуры по толщине стенки:
*1*—знакопеременное течение; *2*—прогрессирующее формоизменение при условии текучести: $\max\{|m^0|+2t_n/3;\ |n^0|+|m^0|/2+t_n/2\}=1$; *3*—прогрессирующее формоизменение при условии текучести: $\max\{|m^0|+2t_n/3;\ |n^0|+t_n/2\}=1$. (Решение задачи о прогрессирующем формоизменении при условии текучести по теории максимальных касательных напряжений находится между линиями *2* и *3*)

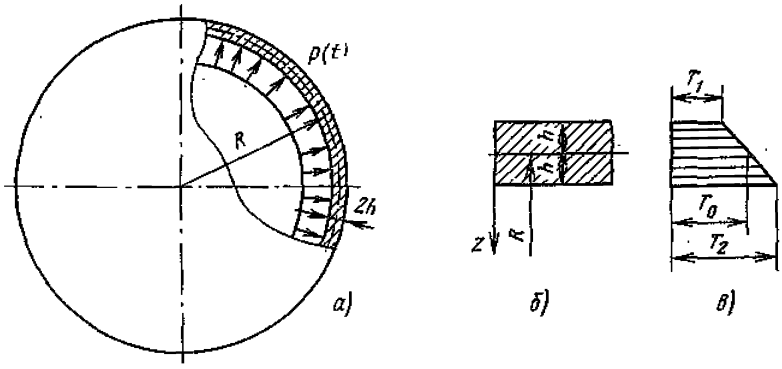



Рис. П4.23. Замкнутая сферическая оболочка:
*а* — оболочка, нагруженная внутренним давлением; *б* — сечение оболочки; *в* — температурный перепад

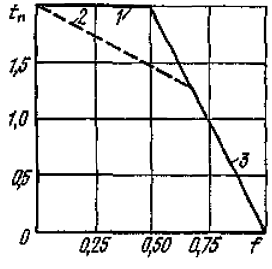
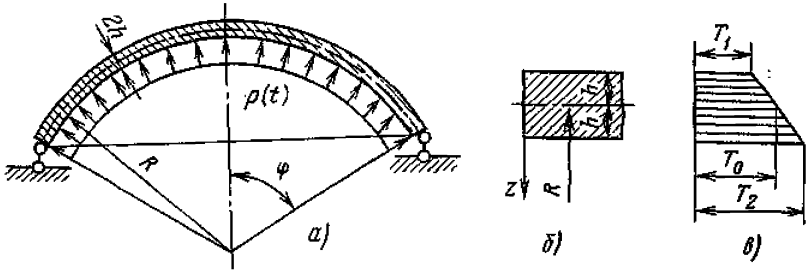



Рис. П4.24. Диаграммы приспособляемости для замкнутой сферической оболочки:
*1* — знакопеременное течение при $p(t)=\text{const}$; *2* — знакопеременное течение при произвольной программе нагружения; *3* — прогрессирующее формоизменение при $p(t)=\text{const}$

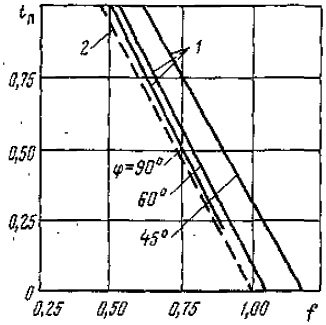
Рис. П4.25. Опертая сферическая оболочка:
*а* — оболочка, нагруженная внутренним давлением; *б* — сечение оболочки; *в* — температурное поле




На рис. П4.31 приведены диаграммы приспособляемости для круглой свободно опертой пластинки, нагруженной равномерно распределенным давлением и температурным полем.

7.12. Круглая свободно опертая пластинка (рис. П4.32) нагружена попеременно распределенным давлением и изгибающим моментом:

$$0 \leqslant p(t) \leqslant p^*; \quad 0 \leqslant M(t) \leqslant M.$$



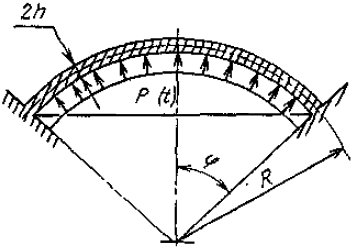




Рис. П4.27. Защемленная сферическая оболочка

Рис. П4.26. Диаграммы приспособляемости для опертой сферической оболочки ($2h/R=1/20$):
*1* — верхняя оценка условия прогрессирующего формоизменения; *2* — нижняя оценка условия прогрессирующего формоизменения

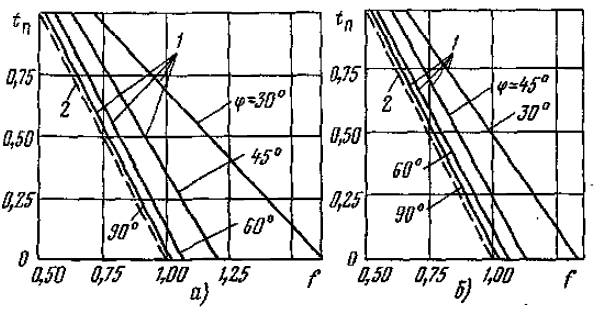



Рис. П4.28. Диаграммы приспособляемости для защемленной сферической оболочки при $2h/R=1/20$ (*а*) и $2h/R=1/40$ (*б*): *1* — верхняя оценка условия прогрессирующего формоизменения; 2 — нижняя оценка

Параметры нагружения:

$$f=p^*R^2/(6\sigma_s h^2);\quad m=M/(\sigma_s h^2).$$

На рис. П4.33 приведена диаграмма приспособляемости для круглой свободно опертой пластинки, нагруженной попеременно распределенным давлением и изгибающим моментом.

7.13. Круглая пластинка, защемленная по краю, нагружена равномерно распределенным давлением и температурным полем (рис. П4.34). Давление изменяется в следующих пределах: $0\leqslant p(t)\leqslant p^*$; параметр нагружения по давлению $f=p^*R^2/(11{,}26\sigma_s h^2)$.

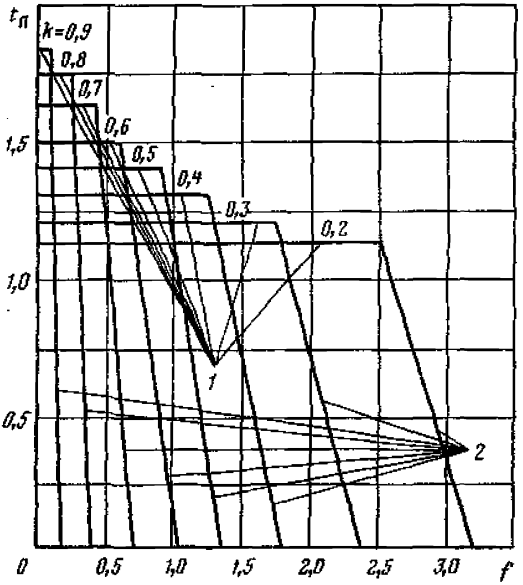



Рис. П4.29. Диаграммы приспособляемости для сферического толстостенного сосуда при $p=\text{const}$:
*1* — знакопеременное течение; *2* — прогрессирующее формоизменение

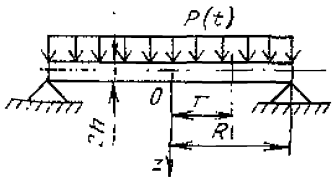



Рис. П4.30. Круглая свободно опертая пластина, нагруженная равномерно распределенным давлением (опоры не препятствуют радиальным перемещениям)

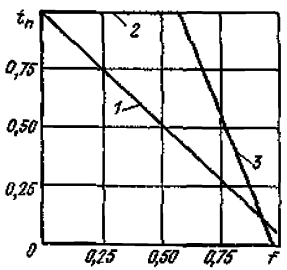



Рис. П4.31. Диаграммы приспособляемости для круглой свободно опертой пластинки, нагруженной равномерно распределенным давлением и температурным полем:
*1* — знакопеременное течение при произвольной программе нагружения: $\frac{15}{16}f+t_п=1$; *2* — знакопеременное течение при $p(t)=\text{const}$, $t_п=1$; *3* — прогрессирующее формоизменение при $p(t)=\text{const}$, $f+\frac{5}{12}t_п=1$

На рис. П4.35 и П4.36 приведены диаграммы приспособляемости для круглой пластинки, защемленной по краю, для следующих температурных полей:

Рис. П4.32. Круглая свободно опертая пластинка, нагруженная попеременно распределенным давлением и изгибающим моментом

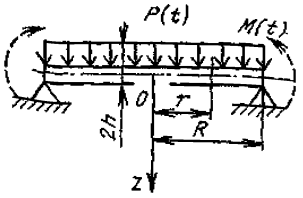



Рис. П4.33. Диаграмма приспособляемости для круглой свободно опертой пластинки, нагруженной попеременно распределенным давлением и изгибающим моментом:
*1*—«мгновенное» пластическое разрушение $m=1$; *2*—«мгновенное» пластическое разрушение $f=1$; *3*—прогрессирующее формоизменение $m(1-x)+\frac{1}{4}f(5-x^2)x=1$; $x^2=\frac{1}{3}(5-4mf)$

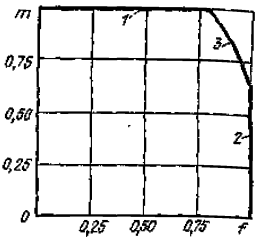
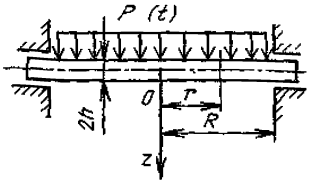



Рис. П4.34. Круглая пластинка, защемленная по краю →




$T(t, z)=T_0(t)+\frac{z}{h}T_1(t)$; $0\leqslant T_1(t)\leqslant T_1$; $\min T_0\leqslant T_0(t)\leqslant\max T_0$; параметр температуры $t=\alpha ET_1/[2\times\times(1-\mu)\sigma_s]$ (рис. П4.35);

$$T(t, z)=T_0(t)+T_1(t)\left[\frac{z}{h}+\frac{1}{2}\left(\frac{z}{h}\right)^2\right];$$

$0\leqslant T_1(t)\leqslant T_1$; параметр температуры $t_n=2\alpha ET_1/[3(1-\mu)\sigma_s]$ (рис. П4.36).

7.14. Свободно опертая круглая пластинка (рис. П4.37) нагружена усилием $P=\text{const}$, распределенным по кольцу, и температурным полем.

Параметры нагружения:

$$f=Pa/(\sigma_s h^2);\quad t_n=\alpha ET_1/\sigma_s.$$

На рис. П4.38, П4.39 приведены диаграммы приспособляемости для свободно опертой круглой пластинки с распределенным по кольцу усилием для следующих температурных полей:

$$T(t, r)=T_0(t)+T_1(t)\frac{r-a}{R-a};\qquad \text{(рис. П4.38)}$$

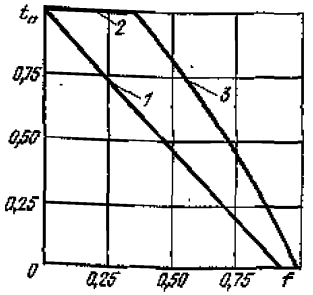



Рис. П4.35. Диаграммы приспособляемости для круглой пластинки, защемленной по краю, при

$$T(t, z)=T_0(t)+\frac{z}{h}T_1(t):$$

*1* — знакопеременное течение при произвольной программе нагружения: $1{,}055f+t_n=1$; *2* — знакопеременное течение при $p^*=\text{const}$, $t_n=1$; *3* — прогрессирующее формоизменение при $p(t)=\text{const}$, $-0\leqslant t_n\leqslant 0{,}75$; $f=0{,}533x^2$; $3x^2-2\ln x-5-\frac{8}{3}t_n$; $-0{,}75\leqslant t_n\leqslant 1{,}0$; $f=1{,}066\left(1-\frac{2}{3}t_n\right)$

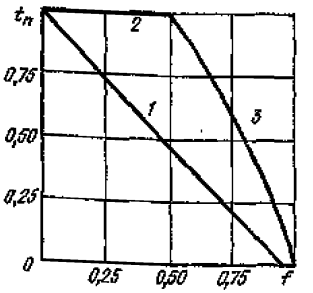



Рис. П4.36. Диаграммы приспособляемости для круглой пластинки, защемленной по краю, при

$$T(t, z)=T_0(t)+T_1(t)\left[\frac{z}{h}+\frac{1}{2}\left(\frac{z}{h}\right)^2\right]:$$

*1* — знакопеременное течение при произвольной программе нагружения: $1{,}055f+t_n=1$; *2* — знакопеременное течение при $p(t)=\text{const}$, $t_n=1$; *3* — прогрессирующее формоизменение при $p(t)=\text{const}$, $f=0{,}535x^2$; $3x^2-2\ln x-5=-2t_n$

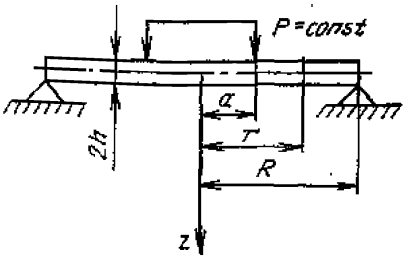



Рис. П4.37. Свободно опертая круглая пластинка с распределенным по кольцу усилием

$$T(t, r)=T_0(t)+T_1(t)\left(\frac{r-a}{R-a}\right)^2 \qquad \text{(рис. П4.39);}$$

Здесь при $a\leqslant r\leqslant R$ $0\leqslant T_1(t)\leqslant T_1$;

при $0\leqslant r\leqslant a$ $T_1(t)=0$;

$$\min T_0\leqslant T_0(t)\leqslant \max T_0;\ k=a/R.$$

7.15. Свободно опертая круглая пластинка со ступенчатым изменением толщины (рис. П4.40) нагружена сосредоточенной силой $P^*$ и температурным полем:

$$P^*=\text{const};\ T(t)=T_0(t) \text{ при } 0\leqslant r\leqslant a \text{ и}$$

$$T(t, r)=T_0(t)+T_1(t)\frac{r-a}{R-a} \text{ при } a\leqslant r\leqslant R.$$

Здесь $-T_1\leqslant T_1(t)\leqslant T_1$; $\min T_0\leqslant T_0(t)\leqslant \max T_0$.

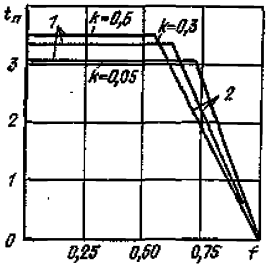



Рис. П4.38. Диаграммы приспособляемости для свободно опертой круглой пластинки с распределенным по кольцу усилием при $T(t, r)=T_0(t)+T_1(t)(r-a)/(R-a)$:
*1* — знакопеременное течение;
*2* — прогрессирующее формоизменение

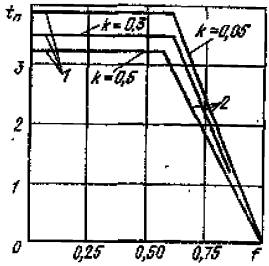



Рис. П4.39. Диаграммы приспособляемости для свободно опертой круглой пластинки с распределенным по кольцу усилием при $T(t, r)=T_0(t)+T_1(t)[(r-a)/(R-a)]^2$:
*1* — знакопеременное течение;
*2* — прогрессирующее формоизменение

Параметры нагружения:

$$f=p^*/(2\pi\sigma_s h^2);\quad t_п=t^*/t_0,$$

где $t^*=\alpha E T_1/[3(1-k)\sigma_s]$; $t_0=1{,}015$; $k=a/R$.

Условие знакопеременного течения:

$$\max_{\rho}\left[|\varphi(\rho)|,\ |\psi(\rho)|,\ |\varphi(\rho)-\psi(\rho)|\right]t^*=1;$$

$$\varphi(\rho)=\psi(\rho)=(1-1{,}5k+0{,}5k^2)(b-2)/(b+k^2)\ \text{ при }\ 0\leqslant\rho\leqslant k;$$

$$\varphi(\rho)=1-\rho-\left(\frac{1}{\rho^2}-1\right)\Phi(b, k);\quad \psi(\rho)=1-2\rho+\left(\frac{1}{\rho^2}+1\right)\Phi(b, k)\ \text{ при } k\leqslant\rho\leqslant 1.$$

Здесь $\rho=\dfrac{r}{R}$; $b=\dfrac{h}{h_1}$; $\Phi(b, k)=\dfrac{1}{2}k^2\dfrac{k(b+3)}{b+k^2}$.

Условие прогрессирующего формоизменения:

$$f=1+k(b^{-1}-1)-t^*\left[b^{-2}k\left(1-1{,}5k+\frac{1}{2}k^2\right)\frac{b-2}{b+k^2}+\int_k^1|\psi(\rho)|\,d\rho\right]$$

при $x(k)<1$;

$$f=\frac{1}{1-k}\left\{1-t^*\left[\int_k^1|\psi(\rho)|\,d\rho+k|\psi(k)|\right]\right\}\ \text{ при }\ x(k)>1.$$

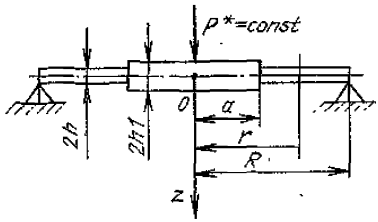



Рис. П4.40. Свободно опертая круглая пластинка со ступенчатым изменением толщины

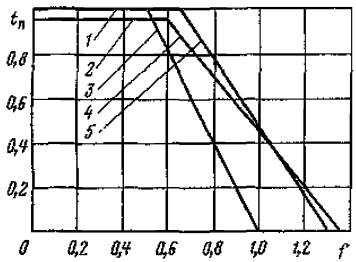



Рис. П4.41. Диаграммы приспособляемости для свободно опертой круглой пластинки со ступенчатым изменением толщины, нагруженной сосредоточенной силой:
*1* — знакопеременное течение для $k=0{,}25$, $b=1$; *2* — знакопеременное течение для $k=0{,}25$, $b\to 0$; *3* — прогрессирующее формоизменение для $k=0{,}25$, $b=1$; *4* — прогрессирующее формоизменение для $k=0{,}25$, $b\to 0$; *5* — прогрессирующее формоизменение для $k=0{,}25$, $b=2/3$

Здесь $$x(k)=\frac{(1-k)b^{-2}\int\limits_0^k(1-t^*|\psi(\rho)|)\,d\rho-k\int\limits_k^1(1-t^*|\psi(\rho)|)\,d\rho}{k(1-t^*|\varphi(k)|)}.$$

На рис. П4.41 приведены диаграммы приспособляемости для свободно опертой круглой пластинки со ступенчатым изменением толщины, нагруженной сосредоточенной силой.

7.16. Для цилиндрических труб, нагруженных внутренним давлением (или осевой силой) без изгиба при циклических изменениях температуры, равномерно распределенной вдоль оси трубы и изменяющейся по толщине, условия начала формоизменения (допуск $2\cdot10^{-4}$%) и деформации, накапливаемые за цикл, могут быть определены в диапазоне рабочих температур до 925 К (650° С) при $\sigma_{RK}/R_{cl}^T\leqslant 4$ из рис. П4.42 в зависимости от $\sigma_m/R_{p0,2}$. Здесь $R_{cl}^T$ — предел ползучести при $t=2\cdot10^5$ ч и накопленной пластической деформации 0,2%; $\sigma_{RK}$ — размах температурных напряжений; $\sigma_m$ — напряжения от давления.

## 8. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ НЕОБРАТИМОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

8.1. Метод распространяется на детали, перечисленные в п. 5.8.

8.2. При оценке составляющей значения необратимого формоизменения от действия нейтронного излучения не учиты-

вается различие интегральных доз облучения по сечению детали.

8.3. Необратимое накопленное изменение размеров $\Delta l$ при флюенсе нейтронов $F_n$ не должно превышать допускаемые необратимое изменение размеров $[\Delta l]$ и флюенс нейтронов $[F_n]$, определяемые приближенно в интервале рабочих температур 623—923 К (350—650° С) по эмпирической формуле

$$[F_n]^2 \gamma_p (T-350)\left(2{,}165-\frac{T}{300}\right)(1+a_1(\sigma)_1)=\frac{[|\Delta l|]}{l},$$

где $T=T_{max}$, °С; $\gamma_p$ — характеристика распухания материала при облучении нейтронами с энергией более 0,1 МэВ (см. табл. П4.1); $(\sigma)_1$ — наибольшее приведенное напряжение от механической нагрузки $[(\sigma)_1<\sigma_s]$, МПа (кгс/мм$^2$); $a_1=0{,}024$ 1/МПа (0,24 мм$^2$/кгс).

8.4. Осевое формоизменение при нейтронном облучении деталей при стационарных осевых температурных градиентах определяется путем линейного суммирования.

8.5. При определении значения необратимого формоизменения в условиях совместного или раздельного действия теплосмен, механической нагрузки и нейтронного излучения изменения размеров линейно суммируются.

## 9. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОГО ЦИКЛА

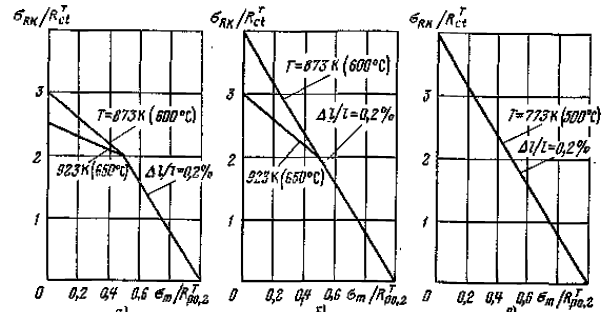
9.1. Данный пример иллюстрирует порядок расчета верхней и нижней оценок параметров предельного цикла с помощью общих методов теории приспособляемости. Характеристики конструкции и условия нагружения выбраны условно с целью наиболее отчетливого изложения этапов расчета. Особенности решений при более сложных условиях нагружения рассматриваются в конце каждого этапа.

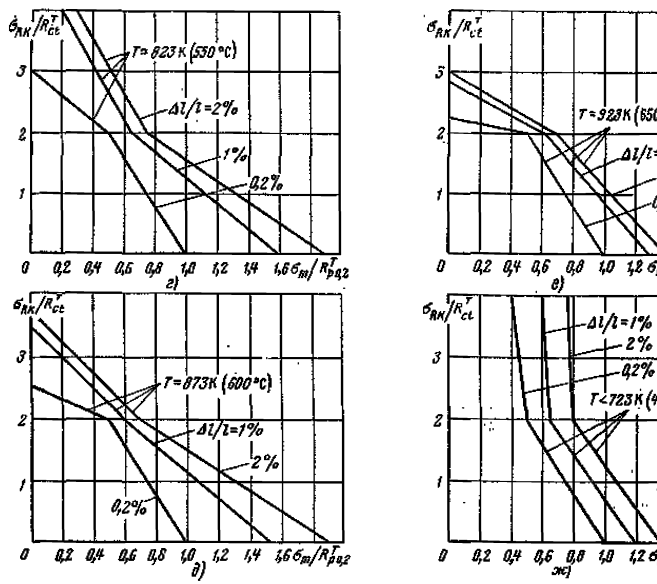
9.2. Рассчитываем цилиндрическую оболочку, закрепленную по краям так, как показано на рис. П4.43. К такой схеме приводится, в частности, расчет оболочки, имеющей на концах достаточно жесткие фланцы, температура которых равна температуре средней поверхности оболочки. Длина оболочки $l$, радиус $R$ и толщина $2h$ заданы. Оболочка подвергается действию постоянного внутреннего давления $p$ и температуры $T(t)$, изменяющейся по линейному закону по толщине оболочки в каждый момент времени $t$:

$$T(t)=T_0(t)+\frac{1}{4}\frac{z}{h}T_*+\frac{1}{2}\frac{z}{h}T_2(t);\quad -\frac{1}{2}T_*\leqslant T_2(t)\leqslant\frac{1}{2}T_*.$$

Здесь $T_0(t)$ — температура срединной поверхности; $T_2(t)$ — разность температур внутренней и наружной поверхности оболочки.

Цель расчета — определение верхней и нижней оценок параметров предельного цикла и последующее сопоставление их



с заданными параметрами рабочего цикла в соответствии с разд. 5.4.

9.3. При выполнении расчета свойства материала оболочки (модуль упругости $E$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$, коэффициент Пуассона $\mu$ и предельные напряжения $\sigma_s$) определяются в соответствии с разд. 6.3, 3.1 и 3.2 так же, как это было сделано в предыдущем примере. Числовые данные здесь не приводятся, поскольку в приведенном ниже примере расчета принимается, что величина $\sigma_s$ является постоянной и расчет верхней и нижней оценок ведется в общем виде без использования конкретных числовых значений. Изменения в методике расчета при численном задании переменной величины $\sigma_s$ указываются в конце каждого этапа расчета.

Условные упругие напряжения от неравномерного нагрева

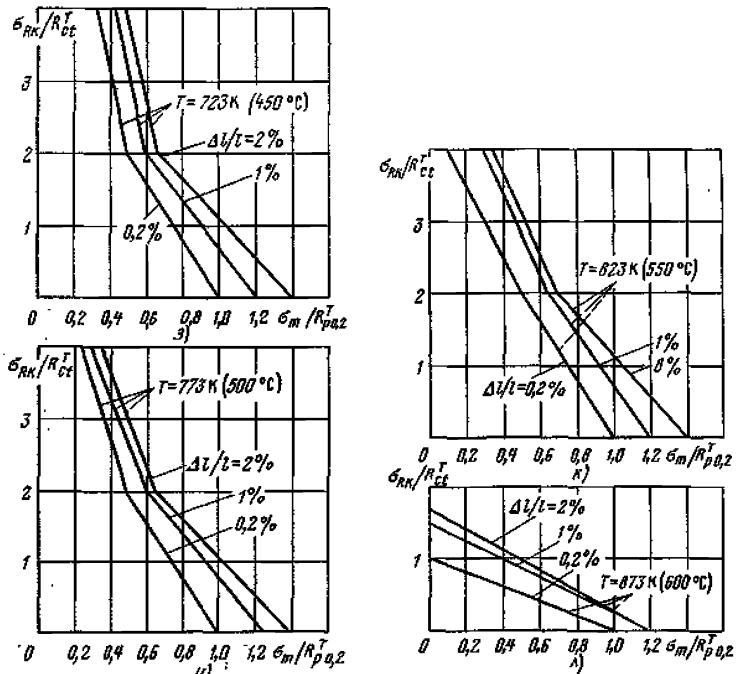



Рис. П4.42. Диаграммы равного формоизменения элементов типа труб (стержней) при теплосменах и механической нагрузке после 1000 циклов нагружения длительностью до $2 \cdot 10^5$ ч:

*а*—хромоникелевые стали после наклепа до 15%; *б*—хромоникелевые дисперсионно-твердеющие стали; *в, г, д, е*—хромоникелевые стали; *ж, з, и, к, л*—низколегированные стали

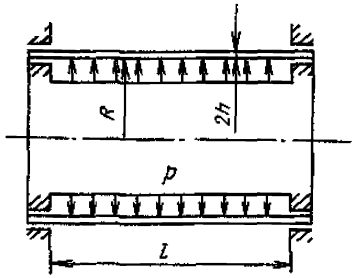



Рис. П4.43. Расчетная схема оболочки

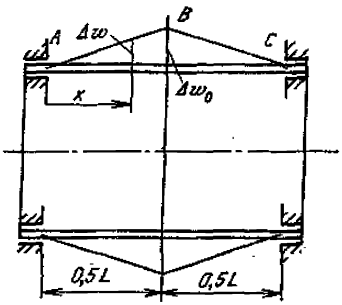



Рис. П4.44. Распределение приращений радиальных перемещений оболочки

определяем по формуле

$$\sigma_{\varphi T}=\sigma_{\theta T}=-\frac{\alpha E T_2(t)}{2(1-\mu)}\frac{z}{h}.$$

Здесь $\sigma_{\theta T}$, $\sigma_{\varphi T}$ — кольцевые и осевые напряжения соответственно; координата $z$ отсчитывается от срединной поверхности оболочки по нормали к ней; ось $z$ направлена к оси оболочки, $-h\leqslant z\leqslant h$.

9.4. Расчет верхней оценки условий прогрессирующего формоизменения.

Расчет проводится в следующем порядке:

а) в соответствии с п. 5.6.8 задается распределение приращений радиальных перемещений за цикл $\Delta w$, показанное на рис. П4.44,

$$\Delta w=\Delta w_0\,2x/L\quad 0\leqslant x\leqslant L/2,$$

а также равные нулю приращения осевых перемещений за цикл $\Delta u$

$$\Delta u=0.$$

В соответствии со схемой, приведенной на рис. П4.44, в сечениях $A$, $B$ и $C$ имеют место разрывы приращений осевых перемещений за цикл $\Delta u'_\varphi$: в сечениях $A$ и $C$ $\Delta u'_\varphi=z2\Delta w_0/L$; в сечении $B$ $\Delta u'_\varphi=-2z\Delta\alpha=-z4\Delta w_0/L$;

б) находим с помощью условий совместности деформаций приращения окружных и осевых деформаций за цикл $\Delta\varepsilon_\theta$, $\Delta\varepsilon_\varphi$, соответствующие заданным приращениям перемещений при $0<x<0{,}5L$.

Для цилиндрической оболочки

$$\Delta\varepsilon=\frac{\Delta w}{R};\quad \Delta\varepsilon_\varphi=\frac{d}{dx}(\Delta u)+z\frac{d^2(\Delta w)}{dx^2}.$$

Подставляя сюда значения приращений перемещений, получаем

$$\Delta\varepsilon_\theta=\frac{\Delta w_0}{R}\frac{2x}{L}\geqslant 0;\quad \Delta\varepsilon_\varphi=0;$$

в) записываем условия существования прогрессирующего формоизменения согласно п. 5.6.5.

Для данной задачи $a=1$, $b=0$, поскольку $\Delta\varepsilon_0>0$, $\Delta\varepsilon_\varphi=0$. При этом: $\Delta\varepsilon_{\theta+}=\frac{\Delta w_0}{R}\frac{2x}{L}$; $\Delta\varepsilon_{\varphi+}=0$, так как приращения окружных пластических деформаций положительны;

$$\Delta u'_{\varphi+}=z\frac{2\Delta w_0}{L},\quad \Delta u'_{\varphi-}=0 \text{ для сечений } A \text{ и } C \text{ при } z>0;$$

$$\Delta u'_{\varphi+}=0,\quad \Delta u'_{\varphi-}=z\frac{2\Delta w_0}{L} \text{ для сечений } A \text{ и } C \text{ при } z<0;$$

$$\Delta u'_{\varphi+}=0,\quad \Delta u'_{\varphi-}=-z\frac{4\Delta w_0}{L} \text{ для сечения } B \text{ при } z>0;$$

$$\Delta u'_{\varphi+}=-z\frac{4\Delta w_0}{L},\quad \Delta u'_{\varphi}=0 \text{ для сечения } B \text{ при } z<0.$$

С учетом симметрии распределения приращений пластических деформаций и постоянства величин $\sigma_s$, $\sigma_{\theta T}$ и $\sigma_{\varphi T}$ по длине оболочки условие существования прогрессирующего формоизменения, приведенное в п. 5.6.5, принимает вид

$$\int_0^{L/2}dx\int_{-h}^{h}\min_t\left(\sigma_s-\sigma_\theta^{(e)}\right)\frac{\Delta w_0}{R}\frac{2x}{L}dz+\int_0^{h}\min_t\left(\sigma_{sA}-\sigma_{\varphi A}^{(e)}\right)z\frac{2\Delta w_0}{L}dz+$$

$$+\int_{-h}^{0}\min_t\left[\left(-\sigma_{sA}-\sigma_{\varphi A}\right)z\frac{2\Delta w_0}{L}\right]dz+$$

$$+\int_0^{h}\min_t\left[\left(-\sigma_{sB}-\sigma_{\varphi B}^{(e)}\right)\left(-z\frac{2\Delta w_0}{L}\right)\right]dz+$$

$$+\int_{-h}^{0}\min_t\left[\left(\sigma_{sB}-\sigma_{\varphi B}^{(e)}\right)\left(-z\frac{2\Delta w_0}{L}\right)dz\leqslant\int_0^{L/2}p\Delta w_0\frac{2x}{L}dx.\right. \qquad (\text{П4.1})$$

Индексы $A$ и $B$ указывают, что соответствующие величины относятся к сечениям $A$ и $B$ (см. рис. П4.44).

Найдем минимальные за время цикла значения подынтегральных выражений левой части этого неравенства. Учитывая, что

$$\sigma_s = \operatorname*{const}_t > 0, \quad x > 0, \quad \Delta w_0 > 0,$$

а значения условных упругих напряжений $\sigma_\theta^{(e)}$, $\sigma_\varphi^{(e)}$ определяются в соответствии с выражениями, приведенными в разд. 9.3 и 9.2, получаем:

а) при $-h \leqslant z \leqslant h$

$$\min_t \left(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right) = \min_t \left[\sigma_s + \frac{\alpha E T_2(\tau)}{2(1-\mu)} \frac{z}{h}\right] = \sigma_s - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \frac{|z|}{h}.$$

Отметим, что при $z > 0$ минимум достигается, если $T_2(t) = \frac{1}{2} T_*$, а при $z < 0$ — если $T_2(t) = \frac{1}{2} T_*$;

б) при $0 \leqslant z \leqslant h$

$$\min_t \left(\sigma_{sA} - \sigma_{\varphi A}^{(e)}\right) z = \sigma_s z - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \frac{z^2}{h},$$

он достигается, если $T_2(t) = -\frac{1}{2} T_*$;

в) при $-h \leqslant z \leqslant 0$

$$\min_t \left[\left(-\sigma_{sA} - \sigma_{\varphi A}^{(e)}\right) z\right] = -\sigma_s z - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \frac{z^2}{h}$$

для $T_2(t) = -\frac{1}{2} T_*$;

г) при $0 \leqslant z \leqslant h$

$$\min_t \left[\left(-\sigma_{sB} - \sigma_{\varphi B}^{(e)}\right)(-z)\right] = \sigma_s z - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \frac{z^2}{h}$$

для $T_2(t) = \frac{1}{2} T_*$;

д) при $-h \leqslant z \leqslant 0$

$$\min_t \left[\left(\sigma_{sB} - \sigma_{\varphi B}^{(e)}\right)(-z)\right] = -\sigma_s z - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \frac{z^2}{h}$$

для $T_2(t) = \frac{1}{2} T_*$.

Подставляя полученные значения в неравенство (П4.1), получаем после интегрирования условие существования прогрессирующего формоизменения в виде

$$\frac{pR}{2\sigma_s h} \geqslant 1 - \frac{\alpha E \Delta T_*}{8(1-\mu)\sigma_s} + \frac{8hR}{L^2}\left[1 - \frac{\alpha E \Delta T_*}{6(1-\mu)\sigma_s}\right]. \qquad (П4.2)$$

Отметим, что в общем случае, когда величина $\sigma_s$ изменяется в течение цикла в зависимости от температуры (и является переменной по объему оболочки), а температурное поле оболочки нелинейное и задано численно, последовательность расчета отличается от приведенной выше тем, что интегрирование в неравенстве (П4.1) проводится для всей длины оболочки (симметрия отсутствует), а минимальные значения подынтегральных выражений находятся численно из сопоставления соответствующих величин, полученных для ряда моментов времени.

Полученный результат является верхней оценкой параметров предельного цикла: он определяет условия реализации в предельном цикле поля приращений перемещений, изображенного на рис. П4.44.

9.5. Расчет нижней оценки условий прогрессирующего формоизменения.

В соответствии с п. 5.6.2 приспособляемость оболочки обеспечена, если можно задать не зависящие от времени напряжения $\sigma_\theta^0$, $\sigma_\varphi^0$, удовлетворяющие:

а) условиям равновесия

$$\frac{d^2 M_\varphi^0}{dx^2} + \frac{1}{R} N_\theta^0 - p = 0; \quad N_\varphi^0 = 0; \qquad (П4.3)$$

$$M_\varphi^0 = \int_{-h}^{h} \sigma_\varphi^0 z\,dz; \quad N_\theta^0 = \int_{-h}^{h} \sigma_\theta^0\,dz; \quad N_\varphi^0 = \int_{-h}^{h} \sigma_\varphi^0\,dz \qquad (П4.4)$$

(положительные направления усилий показаны на рис. П4.45);

б) неравенству п. 5.6.2, которое с учетом п. 5.6.3 применительно к данной задаче имеет следующий вид:

$$\max_t\left(-\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right) \leqslant \sigma_\theta^0 \leqslant \min_t\left(\sigma_s - \sigma_\theta^{(e)}\right);$$

$$\max_t\left(-\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right) \leqslant \sigma_\varphi^0 \leqslant \min_t\left(\sigma_s - \sigma_\varphi^{(e)}\right);$$

$$\max_t\left[-\sigma_s - \left(\sigma_\theta^{(e)} - \sigma_\varphi^{(e)}\right)\right] \leqslant \sigma_s^0 - \sigma_\varphi^0 \leqslant \min_t\left[\sigma_s - \left(\sigma_\theta^{(e)} - \sigma_\varphi^{(e)}\right)\right].$$

Подставляя в эту систему значения условных упругих напряжений (разд. 9.3) и учитывая пределы изменения температуры (разд. 9.2), получаем при $\sigma_s = \text{const}$

$$-\sigma_s+\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h}\leqslant\sigma_\theta^0\leqslant\sigma_s-\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h};\qquad(\text{П4.5})$$

$$-\sigma_s+\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h}\leqslant\sigma_\varphi^0\leqslant\sigma_s-\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h};\qquad(\text{П4.6})$$

$$-\sigma_s\leqslant\sigma_\theta^0-\sigma_\varphi^0\leqslant\sigma_s.\qquad(\text{П4.7})$$

Для получения нижней оценки условий приспособляемости следует задаться значениями напряжений $\sigma_\theta^0$, $\sigma_\varphi^0$ так, чтобы выполнялись неравенства (П4.5)—(П4.7) и найти из условий (П4.3), (П4.4) соответствующее значение $p$. Для задания напряжений $\sigma_\theta^0$, $\sigma_\varphi^0$ могут быть использованы введенные ранее (при расчете верхней оценки условий прогрессирующего формоизменения) предположения о распределении приращений пластических деформаций (рис. П4.44):

а) в соответствии с рис. П4.44 повсюду в оболочке имеет место растяжение в окружном направлении, поэтому можно предположить, что окружные напряжения $\sigma_\theta^0$ всюду достигают предельных (верхних) значений, определяемых неравенствами (П4.5), т. е.

$$\sigma_\theta^0=\sigma_s-\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h}\qquad(\text{П4.8})$$

(это распределение напряжений иллюстрирует рис. П4.46, *а*);

б) симметричному распределению приращений перемещений, показанному на рис. П4.44, отвечает предположение о равенстве изгибающих моментов при $x=0$, $x=L$:

$$(M_\varphi^0)_{x=0}=(M_\varphi^0)_{x=L};$$

в) предположим, что осевые напряжения $\sigma_\varphi^0$ распределяются по толщине оболочки по линейному закону (рис. П4.46, *б*, *в*):

$$\sigma_\varphi^0=\sigma_\varphi^* z/h.$$

Величины $\sigma_\varphi^*$ могут быть разными в разных сечениях оболочки. Их численные значения пока не задаются. В ходе дальнейшего расчета отыскиваются такие значения $\sigma_\varphi^*$, при которых величина $p$ принимает наибольшее значение при выполнении условий (П4.3)—(П4.7). Отметим, что предполагаемый закон распределения напряжений не связан непосредственно с распределением приращений перемещений, изображенным на рис. П4.44;

г) преобразуем систему ограничений (П4.3)—(П4.7) с учетом предположений а), б) и в). Подставляя предполагаемые значения напряжений в выражения (П4.4), получаем

$$M_\varphi^0=\frac{2}{3}\sigma_\varphi^* h^2;\quad N_\theta^0=2\sigma_s h\left[1-\frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}\right];\quad N_\varphi^0\equiv 0.$$

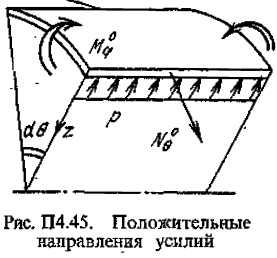



Рис. П4.45. Положительные направления усилий

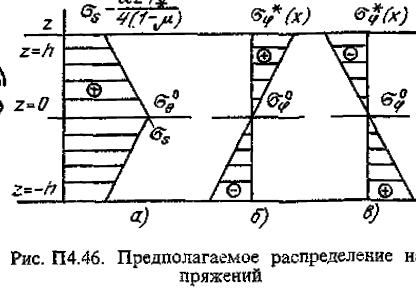



Рис. П4.46. Предполагаемое распределение напряжений

Подставляем полученные значения усилий в уравнение равновесия (П4.3). После двукратного интегрирования с учетом предполагаемого равенства изгибающих моментов при $x=0$ и $x=L$ это уравнение принимает вид

$$\frac{2}{3}\sigma_\varphi^* h^2 = \frac{1}{2}p(x^2 - xL) - \frac{\sigma_s h}{R}\left[1 - \frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}\right](x^2 - xL) + \frac{2}{3}\sigma_{\varphi A}^* h^2. \quad (\text{П4.9})$$

Неравенства (П4.5) выполняются повсюду в оболочке в соответствии с предположением а). Для выполнения неравенств (П4.6), (П4.7) во всех точках любого поперечного сечения оболочки достаточно, чтобы они выполнялись при $z=h$ и $z=-h$ (поскольку с учетом предполагаемых распределений напряжений $\sigma_\varphi^*$ и $\sigma_\theta^*$ левая и правая части каждого из этих неравенств содержат линейные функции координаты $z$ и кроме того $\sigma_\varphi^0 = 0$ при $z=0$). При этом условия (П4.6) принимают вид:

$$-\sigma_s + \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \leqslant \sigma_\varphi^* \leqslant \sigma_s - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}, \quad (\text{П4.10})$$

а условия (П4.7) — такой вид:

$$-\frac{\alpha E \Delta T_*}{4(1-\mu)} \leqslant \sigma_\varphi^0 \leqslant 2\sigma_s - \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \text{ при } z=h \text{ и } z=-h.$$

Это неравенство преобразуется с учетом соотношений

$$\sigma_\varphi^0 = \sigma_\varphi^* \text{ при } z=h \text{ и } \sigma_\varphi^0 = -\sigma_\varphi^* \text{ при } z=-h$$

к следующему:

$$-\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \leqslant \sigma_\varphi^* \leqslant \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}; \quad (\text{П4.11})$$

д) для выполнения неравенств (П4.10), (П4.11) во всех сечениях оболочки достаточно, чтобы они выполнялись там, где

напряжения $\sigma_\varphi^*$ достигают экстремальных (наибольших и наименьших) значений. В соответствии с уравнением (П4.9) такие значения могут достигаться на краях оболочки (при $x=0$ и $x=L$; напряжения $\sigma_\varphi^*=\sigma_{\varphi A}^*$) либо при $x=0{,}5L$, поскольку в этом сечении

$$\frac{d\sigma_\varphi^*}{dx}=\frac{3}{2h^2}\left\{\frac{1}{2}p-\frac{\sigma_s h}{R}\left[1-\frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}\right]\right\}(2x-L)=0;$$

при этом

$$\sigma_\varphi^*=\sigma_{\varphi B}^*=\frac{3}{2h^2}\left\{\frac{1}{2}p-\frac{\sigma_s h}{R}\left[1-\frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}\right]\right\}\left(-\frac{L^2}{4}\right)+\sigma_{\varphi A}^*;$$

е) из последнего уравнения находим значение давления $p$:

$$p=\frac{16h^2}{3L^2}(\sigma_{\varphi A}^*-\sigma_{\varphi B}^*)+\frac{2\sigma_s h}{R}\left[1-\frac{\alpha E\Delta T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}\right].$$

Подставляя сюда значения напряжений $\sigma_{\varphi A}^*$, $\sigma_{\varphi B}^*$, удовлетворяющие неравенствам (П4.10) и (П4.11), получаем значение давления $p$, являющееся нижней оценкой условий приспособляемости. Наилучшая из получаемых таким путем оценок имеет вид

$$p=\frac{16h^2}{3L^2}(\max\sigma_\varphi^*-\min\sigma_\varphi^*)+\frac{2\sigma_s h}{R}\left[1-\frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}\right]. \qquad (П4.12)$$

Наибольшее значение напряжений $\sigma_\varphi^*$, при котором выполняются все неравенства (П4.10) и (П4.11), равно

$$\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)},\ \text{если}\ \frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)}\leqslant\frac{1}{2}\sigma_s;$$

$$\sigma_s-\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)},\ \text{если}\ \sigma_s\geqslant\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)}\geqslant\frac{1}{2}\sigma_s.$$

Наименьшее значение напряжений $\sigma_\varphi^*$, при котором выполняются неравенства (П4.10) и (П4.11), равно

$$-\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)},\ \text{если}\ \frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)}\leqslant\frac{1}{2}\sigma_s;$$

$$-\sigma_s+\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)},\ \text{если}\ \sigma_s\geqslant\frac{\alpha E\Delta T_*}{4(1-\mu)}\geqslant\frac{1}{2}\sigma_s.$$

Подставляя эти значения в уравнение (П4.12), получаем, что приспособляемость оболочки гарантирована, если

$$\frac{pR}{2\sigma_s h}\leqslant 1-\frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s}+\frac{8hR}{L^2}\frac{\alpha E T_*}{6(1-\mu)\sigma_s}\ \text{при}\ \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\leqslant\frac{1}{2}\sigma_s; \qquad (П4.13)$$

$$\frac{pR}{2\sigma_s h} \leqslant 1 - \frac{\alpha E T_*}{8(1-\mu)\sigma_s} + \frac{8hR}{L^2}\left[\frac{2}{3} - \frac{\alpha E T_*}{6(1-\mu)\sigma_s}\right]$$

$$\text{при } \sigma_s \geqslant \frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)} \geqslant \frac{1}{2}\sigma_s. \qquad (\text{П4.14})$$

Эти результаты иллюстрируют при $L^2/(8Rh)=0{,}6$ линии *2* и *3* на рис. П4.47; верхней оценке условий прогрессирующего формоизменения (П4.2) соответствует здесь линия *1*.

Отметим, что в общем случае, когда величины $\sigma_s$ изменяются в течение цикла в зависимости от температуры, а температурное поле оболочки нелинейное и задано численно, последовательность расчета отличается от приведенной выше тем, что:

а) при получении уравнения (П4.9) из условий равновесия (П4.3) интегрирование окружных сил $N_\theta^0$ проводится численно;

б) расположение сечений, в которых напряжения $\sigma_\varphi^*$ достигают экстремальных значений, а также величины напряжений $\sigma_\varphi^*$, обеспечивающие выполнение ограничений — неравенств, находятся подбором.

9.6. Сопоставление верхней и нижней оценок параметров предельного цикла с параметрами рабочего цикла. Уточнение верхней и нижней оценок.

После получения верхней и нижней оценок параметров предельного цикла они сопоставляются с параметрами рабочего цикла в соответствии с разд. 5.4.

Если параметры рабочего цикла выше верхней оценки параметров предельного цикла, то приспособляемость невозможна.

Если параметры рабочего цикла ниже нижней оценки параметров предельного цикла, то конструкция приспособится к заданным воздействиям.

Если параметры рабочего цикла ниже верхней, но выше нижней оценки параметров предельного цикла (это возможно при существенном различии верхней и нижней оценок), то выполняется уточненный расчет параметров предельного цикла.

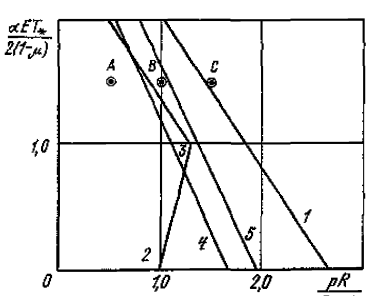



Рис. П4.47. Диаграмма приспособляемости оболочки

Рассмотрим три примера расчета, различающихся заданным давлением в рабочем цикле при одинаковых геометрических характеристиках оболочки $\left[L^2/(8Rh)=0{,}6\right]$ и одинаковых температурах $\left(\alpha E\Delta T/\left[2(1-\mu)\right]=1{,}5\right)$. Пусть для заданных условий работы оболочки

$$\text{a)}\ \frac{pR}{2\sigma_s h}=0{,}5;\quad \text{b)}\ \frac{pR}{2\sigma_s h}=1{,}0;\quad \text{c)}\ \frac{pR}{2\sigma_s h}=1{,}5.$$

Указанным значениям параметров рабочего цикла отвечают точки $A$, $B$ и $C$ на рис. П4.47. В соответствии с условием (П4.2) приспособляемость для рассматриваемого случая невозможна, если

$$\frac{pR}{2\sigma_s h}\geqslant 1{,}46.$$

Следовательно, при $pR/(2\sigma_s h)=1{,}5$ приспособляемость невозможна.

В соответствии с условием (14) разд. 9.5 приспособляемость обеспечена, если $pR/(2\sigma_s h)<0{,}9$. Следовательно, при $pR/(2\sigma_s h)=0{,}5$ оболочка приспособится к заданным воздействиям.

Наконец, при $pR/(2\sigma_s h)=1$ полученные верхняя и нижняя оценки не позволяют ответить на вопрос о возможности приспособляемости. Заметим, что при расчете в разд. 9.5 уточненной нижней оценки распределение окружных напряжений принималось таким, каким оно действительно является в предельном цикле, если изгиб отсутствует. Поэтому полученная выше нижняя оценка в пределе (при $L\to\infty$) совпадала с верхней оценкой, но для коротких оболочек, в формоизменении которых изгиб играет существенную роль, эта нижняя оценка далека от точного решения. Чтобы получить лучшую нижнюю оценку для коротких оболочек, зададим

$$\sigma_\theta^0=0;\quad \pm\left[\sigma_\varphi^0\right]=\left[\sigma_s-\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h}\right]\operatorname{sign} z.$$

В одном сечении используется только верхний либо только нижний знак.

Решение, аналогичное рассмотренному в разд. 9.5, приводит тогда к следующему условию приспособляемости:

$$\frac{pR}{2\sigma_s h}\leqslant\frac{8hR}{L^2}\left[1-\frac{\alpha E T_*}{6(1-\mu)\sigma_s}\right]$$

(ему соответствует линия *4* на рис. П4.47).

Сопоставление этого результата с верхней оценкой (2) показывает, что разница между ними убывает с уменьшением величины $L^2/(8Rh)$ и для достаточно коротких оболочек

становится пренебрежимо малой. Однако при

$$\frac{L^2}{8Rh}=0{,}6 \quad \text{и} \quad \frac{\alpha E T_*}{2(1-\mu)\sigma_s}=1{,}5$$

полученная здесь нижняя оценка дает $pR/(2\sigma_s h)\leqslant 0{,}83$, т. е. оказывается хуже нижней оценки, полученной в разд. 9.5.

Для улучшения нижней оценки для оболочек средней длины следует задать ненулевые окружные напряжения $\sigma_\theta^0$, обеспечивающие получение бо́льших изгибающих моментов $M_\varphi^0$, чем те, которые были получены в разд. 9.5. Пусть, например,

$$\sigma_\theta^0=k\left[1+\sin\left(\frac{4\pi x}{L}-\frac{\pi}{2}\right)\right]\left[\sigma_s-\frac{\alpha E T_*}{4(1-\mu)}\frac{|z|}{h}\right],$$

где $k$ — неизвестный множитель, который подбирается в ходе решения так, чтобы получить наилучшую нижнюю оценку $0\leqslant k\leqslant 0{,}5$. Результат расчета, аналогичного рассмотренному в разд. 9.5, иллюстрирует линия *5* на рис. П4.47 при $\alpha E T_*/[2(1-\mu)]=1{,}5$; соответствующее условие приспособляемости имеет вид

$$\frac{pR}{2\sigma_s h}\leqslant 1{,}09.$$

Таким образом, при $pR/(2\sigma_s h)=1$ прогрессирующего формоизменения оболочки не будет.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 5*
(рекомендуемое)

## РАСЧЕТ ТИПОВЫХ УЗЛОВ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Настоящее приложение содержит рекомендуемые методы определения напряжений в трубопроводах и разъемных соединениях сосудов.

Выбор основных размеров элементов конструкции (толщин стенок) проводят по формулам разд. 3 Норм.

Расчет выполняют для режимов эксплуатации и на основные расчетные нагрузки, указанные в пп. 5.1.3; 5.1.4 Норм.

Формулы для расчета напряжений, приведенные в настоящем приложении, не исключают возможности использования для расчета конструкций более точных формул и соотношений.

# 2. ТРУБОПРОВОДЫ

## 2.1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$D_a$ — номинальный наружный диаметр поперечного сечения трубы, мм

$D$ — внутренний диаметр ($D=D_a-2s$), мм

$s$ — номинальная толщина стенки трубы, мм

$r$ — средний радиус поперечного сечения $\left[r=(D_a-s)/2\right]$, мм

$R$ — радиус оси криволинейной трубы, мм

$a$ — эллиптичность (овальность) поперечного сечения (отношение разности максимального и минимального наружных диаметров сечения к их полусумме), %

$A_s$ — площадь поперечного сечения трубы, мм$^2$

$W$ — момент сопротивления изгибу поперечного сечения трубы, мм$^3$

$\lambda$ — безразмерный геометрический параметр ($\lambda=Rs/r^2$)

$p$ — расчетное внутреннее давление в трубопроводе, МПа

$M_x$, $M_y$, $M_z$ — изгибающие и крутящий моменты в сечении трубопровода, Н·мм

$N_z$ — осевая сила в сечении трубопровода от действия массовой нагрузки и самокомпенсации температурных расширений, Н

$\omega$ — безразмерный параметр внутреннего давления $\left(\omega=1{,}82\dfrac{pR^2}{Esr}\right)$

$E$ — модуль упругости материала, МПа

$K_p$ — коэффициент податливости криволинейной трубы, учитывающий влияние внутреннего давления (отношение податливостей на изгиб криволинейной и прямолинейной труб одинакового сечения и из одинакового материала)

$K_p^*$ — коэффициент податливости криволинейной трубы, учитывающий влияние внутреннего давления и сопряжения с прямолинейными трубами

$\gamma_m$ — коэффициент интенсификации изгибных поперечных напряжений в криволинейной трубе

$\beta_m$ — коэффициент интенсификации изгибных продольных напряжений в криволинейной трубе

$\sigma^0_{zMN}$, $\sigma^0_{zMN(s)}$ — продольные напряжения, возникающие под действием изгибающего момента и осевой силы, МПа

$\sigma_\psi$ — окружное (тангенциальное) напряжение в стенке трубы, МПа

$\sigma_z$ — осевое (продольное) напряжение в стенке трубы, МПа

$\sigma_r$ — радиальное напряжение в стенке трубы, МПа

$\tau$ — напряжение кручения, МПа

$\sigma_{Tp}$, $\sigma_{T0}$, $\sigma_T^*$ — температурные напряжения, МПа

$(\sigma)_2$, $(\sigma)_{RK}$, $(\sigma_{aF})_K$, $(\sigma)_\pi$ — приведенные напряжения, МПа

$[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение, МПа
$\varphi_w$ — коэффициент снижения прочности сварного шва
$\alpha_\sigma$ — коэффициент концентрации тангенциальных напряжений
$K_{1(5)}$ — коэффициент местных изгибных напряжений в трубе от воздействия штуцера.

### 2.2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.2.1. Данный раздел распространяется на расчет низкотемпературных и высокотемпературных трубопроводов АЭС. К классу низкотемпературных трубопроводов относятся трубопроводы из углеродистых, легированных, кремнемарганцовистых и высокохромистых сталей, из сталей аустенитного класса, жаропрочных хромомолибденованадиевых сталей, железоникелевых сплавов и циркониевых сплавов с расчетной температурой не более $T_t$. К классу высокотемпературных трубопроводов относятся трубопроводы с более высокой расчетной температурой, превышающей температуру $T_t$ (п 3 2 Норм).

2 2 2. При определении приведенных напряжений различных категорий следует учитывать нагрузки согласно пп. 5.1.3 Норм.

2 2 3. Внутренние усилия в трубопроводе определяют с учетом всех влияющих факторов, в том числе с учетом сил трения, возникающих в опорах скольжения, а также от отклонения подвесок от вертикального положения

2 2 4. Наличие двух знаков (плюс, минус) перед слагаемым в приводимых формулах означает, что расчет приведенных напряжений с использованием данной формулы выполняют как при принятии знака плюс, так и при принятии знака минус. Для оценки прочности берется большее значение приведенного напряжения.

2 2 5. Пониженную жесткость криволинейного отрезка на изгиб учитывают в расчете введением для него коэффициента податливости. Последний учитывает деформирование (сплющивание) поперечного сечения и определяется согласно разд 2.5.

2 2 6. Допускается определять напряжения в криволинейной трубе по методике разд. 2.8.

2 2 7. Допускается определять напряжения в тройниковом соединении по методике разд. 2.9.

### 2 3 НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

2 3 1. Определение напряжений $(\sigma)_2$.

2.3 1.1. Для прямолинейных и криволинейных труб составляющие напряженного состояния определяют по формулам

$$\sigma_\psi = \sigma_{\psi p},$$

где

$$\sigma_{\psi p} = \frac{p\left[D_a - 2(s-c)\right]}{2\varphi(s-c)};$$

$$\sigma_z = \pm\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} + \frac{N_z}{A_s} + \sigma_{zp},$$

где

$$\sigma_{zp} = \frac{p\left[D_a - 2(s-c)\right]^2}{4(D_a - s + c)(s-c)};$$

$$\sigma_r = -p/2; \quad \tau = \frac{M_z}{2W}.$$

Значение коэффициента снижения прочности $\varphi$ принимают согласно п. 4.3 Норм.

Сила $N_z$ считается положительной, если вызывает растяжение трубы.

2.3.1.2. Для криволинейных труб, геометрический параметр $\lambda$ которых удовлетворяет условию $\lambda \leqslant 1{,}4$, дополнительно к определению приведенного напряжения $(\sigma)_2$ при использовании формул п. 2.3.1.1 вычисляют приведенное напряжение по формуле

$$(\sigma)_2 = \frac{\Omega}{\psi}\,\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}}{\varphi W}.$$

Величины $\Omega$ и $\psi$ определяют по табл. П5.1 и П5.2, применяя способ линейной интерполяции.

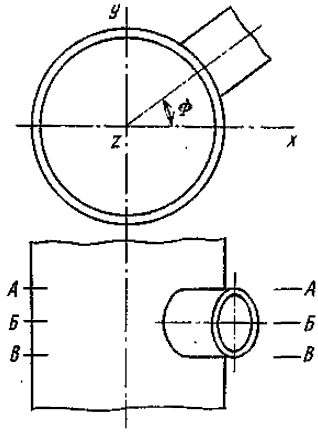
2.3.1.3. Для тройникового узла напряжение $(\sigma)_2$ вычисляют для трех сечений: *А—А*, *Б—Б*, *В—В* (рис. П5.1). Ниже приведены формулы для подсчета составляющих напряженного состояния:

Таблица П5.1. **Значения коэффициента $\psi$**

| $\psi$ | 1,0 | 0,98 | 0,94 | 0,88 | 0,79 | 0,68 | 0,50 | 0,30 | 0,10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{\psi p}/[\sigma]$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 |

Таблица П5.2. **Значения коэффициента $\Omega$**

| $\Omega$ | 18 | 10 | 6 | 3 | 2 | 1,7 | 1,0 | 0,65 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\lambda$ | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,9 | 1,6 |



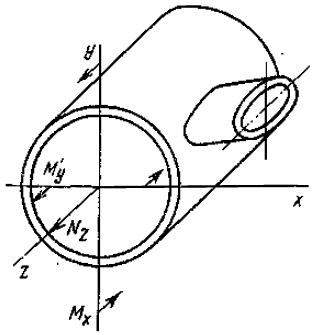




Рис. П5.2. Силовые факторы в поперечном сечении тройникового узла

Рис. П5.1. Тройниковый узел (труба со штуцерами)

для сечений $А—А$ и $В—В$

$$\sigma_\psi = \sigma_{\psi p};$$

$$\sigma_z = \sigma^0_{zMN} \pm 0{,}7\sigma^0_{zMN(s)} K_{н(s)} + \sigma_{zp};$$

для сечения $Б—Б$

$$\sigma_\psi = \sigma_{\psi p} \pm 0{,}7\sigma^0_{zMN(s)} K_{н(s)};$$

$$\sigma_z = \sigma^0_{zMN} + \sigma_{zp}.$$

Напряжения $\tau$, $\sigma_{\psi p}$, $\sigma_{zp}$, $\sigma_r$ в указанных сечениях определяют по формулам п. 2.3.1.1. Продольное напряжение в трубе определяют по формуле

$$\sigma^0_{zMN} = \frac{M_x \sin \Phi - M_y \cos \Phi}{W} + \frac{N_z}{A_s}.$$

Силовые факторы $M_x$, $M_y$, $N_z$ считаются положительными, если направлены так, как показано на рис. П5.2. Угол Ф определяет положение штуцера (рис. П5.1).

Продольное напряжение в штуцере вычисляют по формуле

$$\sigma^0_{zMN(s)} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} + \frac{|N_z|}{A_s},$$

где входящие в формулу величины относятся к сечению штуцера в месте стыковки с трубой.

Коэффициент местных напряжений $K_{н(s)}$ определяют согласно разд. 2.7.

2.3.2. Определение напряжения $(\sigma)_{RK}$.

2.3.2.1. Для прямолинейных и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}4$ определяют составляющие напряженного состояния для наружной поверхности по формулам

$$\sigma_\psi = 2\sigma_{zp};$$

$$\sigma_z = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} + \frac{N_z}{A_s} + \sigma_{zp};$$

$$\sigma_r = 0; \quad \tau = M_z/(2W).$$

2.3.2.2. Для криволинейных труб с $\lambda < 1{,}4$ определяют напряжение $(\sigma)^0_{RK}$ по следующим четырем формулам:

$$(\sigma)^0_{RK} = \frac{1}{W}\sqrt{\left[|M_x|\gamma_m + |M_y|\beta_m + W\sigma_{zp}\right]^2 + M_z^2};$$

$$(\sigma)^0_{RK} = \frac{1}{W}\sqrt{\left[|M_x|\beta_m + |M_y|\gamma_m + W\sigma_{zp}\right]^2 + M_z^2};$$

$$(\sigma)^0_{RK} = \frac{1}{W}\sqrt{\left[|M_x|\gamma_m + WB\sigma_{\psi p}\right]^2 + M_z^2};$$

$$(\sigma)^0_{RK} = \frac{1}{W}\sqrt{\left[|M_y|\gamma_m + WB\sigma_{\psi p}\right]^2 + M_z^2}.$$

Для оценки прочности берется большее из четырех значений.

Коэффициенты $\gamma_m$ и $\beta_m$ определяют по разд. 2.6. Напряжения $\sigma_{zp}$ и $\sigma_{\psi p}$ определяют по формулам п. 2.3.1.1. Коэффициент $B$ вычисляют по формуле

$$B = \frac{2R - r}{2(R - r)}.$$

2.3.2.3. Для тройникового узла производят расчет напряжений по формулам:

для сечений $A-A$ и $B-B$ (рис. П5.1)

$$\sigma_\psi = 0{,}5\alpha_\sigma\sigma_{\psi p};$$

$$\sigma_z = \sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN(s)}K_{н(s)} + \sigma_{zp};$$

для сечения $Б-Б$

$$\sigma_\psi = \sigma_{\psi p} \pm \sigma^0_{zMN(s)}K_{н(s)};$$

$$\sigma_z = 1{,}5\sigma^0_{zMN} + \sigma_{zp}.$$

Радиальное напряжение принимают $\sigma_r = 0$. Величины $\sigma_{\psi p}$, $\sigma_{zp}$, $\sigma^0_{zMN}$, $\sigma^0_{zMN(s)}$, $\tau$ подсчитывают по тем же формулам, что и в п. 2.3.1.3, но при $\varphi = 1$. Определение $K_{н(s)}$ — см. разд. 2.7.

Коэффициент концентрации тангенциальных напряжений на кромке отверстия $\alpha_\sigma$ определяют по формуле

$$\alpha_\sigma = 1{,}2\left[2+2\left(D/D_a\right)^2-\left(D/D_a\right)^4\right].$$

2.3.2.4. В местах сопряжения элементов с различными толщинами стенок или с неодинаковыми теплофизическими характеристиками учитывают размахи общих температурных напряжений, обусловленных осевым перепадом температуры (напряжение $(\sigma)_{T0}$).

Напряжение $(\sigma)_{T0}$ определяют по формуле

$$(\sigma)_{T0} = 0{,}5f\left(\bar{E}_{\mathrm{I}}+\bar{E}_{\mathrm{II}}\right)\left|\left(\frac{1}{s}\int\limits_{-s/2}^{s/2}\alpha(y)\,T(y)\,dy\right)_{\mathrm{I}}-\right.$$

$$\left.-\left(\frac{1}{s}\int\limits_{-s/2}^{s/2}\alpha(y)\,T(y)\,dy\right)_{\mathrm{II}}\right|,$$

где $y$ — расстояние от середины стенки по нормали; $T(y)$ — температура стенки; $\alpha(y)$ — коэффициент линейного расширения материала стенки; $\bar{E}$ — средний по толщине модуль упругости.

Индексы I и II используются для обозначения сопрягаемых элементов.

Толщину стенки следует принимать максимальной в пределах расстояния $\sqrt{Ds}$ от сечения, разделяющего элементы I и II. Значение коэффициента $f$ определяют линейным интерполированием по следующим значениям табл. П5.3.

2.3.2.5. Размах напряжений $(\sigma)_{RK}$ определяют суммированием:

$$(\sigma)_{RK} = (\sigma)^0_{RK} + (\sigma)_{T0},$$

где $(\sigma)^0_{RK}$ — размах приведенного напряжения, вычисленный без учета температурных составляющих от неравномерности температурного поля в стенке.

2.3.3. Определение напряжений $(\sigma_{\alpha F})_K$.

2.3.3.1. Для прямолинейных и криволинейных труб с $\lambda > 1{,}0$ определяют составляющие напряженного состояния (амплитудные значения) по формулам

$$\sigma_\psi = \sigma_{zp},$$

Таблица П5.3. **Значения коэффициентов** $f$

| $s_{\mathrm{I}}/s_{\mathrm{II}}$ | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $f$ | 1,80 | 1,35 | 0,71 | 0,35 | 0,15 | 0 |

$$\sigma_z=\frac{1}{2}\left(\pm\frac{\sqrt{M_x^2+M_y^2}}{W}+\frac{N_z}{A_s}\right)+\frac{1}{2}\sigma_{zp};$$

$$\tau=M_z/(4W);\quad \sigma_r=0.$$

Формулу для определения $\sigma_{zp}$ — см. п. 2.3.1.1.

2.3.3.2. Для криволинейных труб вычисляют напряжение $(\sigma_{aF})_{\text{К}}^{0}$ по формулам

$$(\sigma_{aF})_{\text{К}}^{0}=\frac{1}{2W}\sqrt{\left[|(0{,}7M_x+M_э)|\gamma_m+|0{,}7M_y|\beta_m+W\sigma_{zp}\right]^2+M_z^2};$$

$$(\sigma_{aF})_{\text{К}}^{0}=\frac{1}{2W}\sqrt{\left[|(0{,}7M_x+M_э)|\beta_m+|0{,}7M_y|\gamma_m+W\sigma_{zp}\right]^2+M_z^2};$$

$$(\sigma_{aF})_{\text{К}}^{0}=\frac{1}{2W}\sqrt{\left[|(0{,}7M_x+M_э)|\gamma_m+BW\sigma_{\psi p}\right]^2+M_z^2};$$

$$(\sigma_{aF})_{\text{К}}^{0}=\frac{1}{2W}\sqrt{(|0{,}7M_y|\gamma_m+BW\sigma_{\psi p})^2+M_z^2}.$$

Для оценки прочности берут большее из четырех значений Величину $M_э$ определяют по формуле

$$M_э=-pW\frac{R}{r}\frac{D_a}{s}\frac{\xi a}{100},$$

где $\xi$ — коэффициент, учитывающий отличие действительной формы искажения поперечного сечения от идеально эллиптической. Следует принимать $\xi=2{,}0$.

Положительное направление изгибающих моментов указано на рис. П5.3.

Коэффициенты $\gamma_m$ и $\beta_m$ определяют по разд. 2.6. Напряжения $\sigma_{zp}$, $\sigma_{\psi p}$ подсчитывают по формулам п. 2.3.1.1. Коэффициент $B$ определяют по п. 2.3.2.2.

2.3.3.3. Для тройникового узла определяют составляющие напряженного состояния (амплитудные значения) по следующим формулам:

для сечений $A-A$ и $B-B$ (см. рис. П5.1)

$$\sigma_\psi=0{,}35\alpha_\sigma\sigma_{\psi p};$$

$$\sigma_z=\frac{1}{2}\left[\sigma_{zMN}^{0}\pm\sigma_{zMNs}^{0}K_{\text{н}(s)}+0{,}7\sigma_{zp}\right];$$

для сечений $Б-Б$

$$\sigma_\psi=\frac{1}{2}\left(\sigma_{\psi p}\pm\sigma_{zMNs}^{0}K_{\text{н}(s)}\right);$$

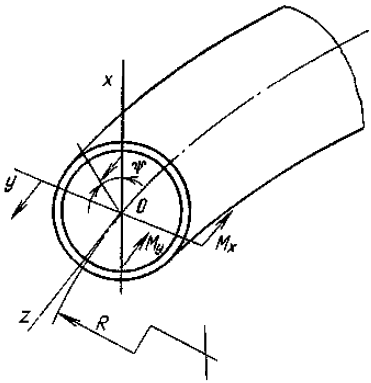



Рис. П5.3. Положительные направления изгибающих моментов в сечении криволинейной трубы

$$\sigma_z=\frac{1}{2}\left(3\sigma^0_{zMN}+\sigma_{zp}\right).$$

Напряжение кручения $\tau$ определяют по формуле п. 2.3.1.1, но с уменьшением в 2 раза. Радиальное напряжение $\sigma_r=0$. Величины $\sigma_{\psi p}$, $\sigma_{zp}$, $\sigma^0_{zMN}$, $\sigma^0_{zMN(s)}$, $K_{\text{н}(s)}$, $\alpha_\sigma$ определяют таким же образом, как требуется согласно п. 2.3.2.3.

2.3.3.4. Определяют размах полного максимального температурного напряжения от перепада температуры по толщине стенки [напряжение $(\sigma)^*_T$] и напряжение $(\sigma)_{T0}$ от осевого перепада температуры. Вычисление $(\sigma)^*_T$ производят по аналитической или численной методике, а вычисление $(\sigma)_{T0}$ — по формуле п. 2.3.2.4.

2.3.3.5. Напряжение $(\sigma_{aF})_K$ для цикла нагружения каждого вида допускается определять суммированием по формуле

$$(\sigma_{aF})_K=(\sigma_{aF})^0_K+\frac{1}{2}(\sigma)^*_T+\frac{1}{2}(\sigma)_{T0},$$

где $(\sigma_{aF})^0_K$ — амплитуда приведенного напряжения, вычисленная без учета температурных составляющих от неравномерности температурного поля в стенке.

2.3.4. Критерии прочности.

Проверку прочности по категориям напряжений $(\sigma)_2$, $(\sigma)_{RK}$ проводят по разд. 5.4 Норм. Проверку прочности по категориям напряжений $(\sigma_{aF})_K$ производят по разд. 5.6 Норм.

### 2.4 ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

2.4.1. Определение напряжений $(\sigma)_2$, $(\sigma)_{RK}$, $(\sigma_{aF})_K$.

2.4.1.1. При определении приведенного напряжения $(\sigma)_2$ осевое напряжение $\sigma_z$ вычисляют с учетом коэффициента снижения прочности поперечного сварного шва по формуле

$$\sigma_z=\pm\frac{\sqrt{M_x^2+M_y^2}}{\varphi_w W}+\frac{N_z}{A_s}+\sigma_{zp},$$

где коэффициент снижения прочности $\varphi_w$ определяют согласно указаниям п. 4.3.3 Норм.

В остальном приведенные напряжения $(\sigma)_2$, $(\sigma_{aF})_K$ определяют по тем же формулам, которые используют в расчете низкотемпературного трубопровода (см. пп. 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3).

2.4.2. Определение напряжения $(\sigma)_{RK}$.

2.4.2.1. Дополнительно к указанным приведенным напряжениям определяют приведенное напряжение $(\sigma)_{RK}$, служащее для оценки длительной статической прочности с учетом местных напряжений и действия всех нагрузок (давление, массовая нагрузка, компенсация) на стационарном рабочем режиме. При этом составляющие напряженного состояния от компенсации температурных расширений разрешается определять с учетом постепенного уменьшения (релаксации) во времени вследствие ползучести.

2.4.2.2. Составляющие напряженного состояния для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}0$ определяют по формулам п. 2.3.1.1.

2.4.2.3. Для криволинейных труб (при любом значении $\lambda$) вычисляют напряжение $(\sigma)_{RK}$ по следующим формулам:

$$(\sigma)_{RK}=\frac{1}{W}\sqrt{\left[|(0{,}6M_x+M_э)|\gamma_m+|0{,}6M_y|\beta_m+W\sigma_{xp}\right]^2+M_z^2};$$

$$(\sigma)_{RK}=\frac{1}{W}\sqrt{\left[|(0{,}6M_x+M_э)|\beta_m+|0{,}6M_y|\gamma_m+W\sigma_{xp}\right]^2+M_z^2};$$

$$(\sigma)_{RK}=\frac{1}{W}\sqrt{\left[|0{,}6M_x+M_э|\gamma_m+W\sigma_{\psi p}\right]^2+M_z^2};$$

$$(\sigma)_{RK}=\frac{1}{W}\sqrt{(|0{,}6M_y|\gamma_m+W\sigma_{\psi p})^2+M_z^2},$$

где $M_э=-\chi_э p W\dfrac{R}{r}\dfrac{D_в}{s}\dfrac{a}{100}$.

Значение $\chi_э$ определяют линейным интерполированием по данным табл. П5.4.

Таблица П5.4. **Значения коэффициента $\chi_э$**

| Сталь | Температура, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 360 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 |
| Углеродистая и кремнемарганцовистая | 0,4 | 0,35 | — | — | — | — | — |
| Хромомолибденовая и хромомолибденованадиевая | 0,5 | 0,45 | 0,4 | 0,35 | 0,2 | — | — |
| Аустенитного класса | — | 0,55 | 0,5 | 0,4 | 0,35 | 0,3 | 0,2 |

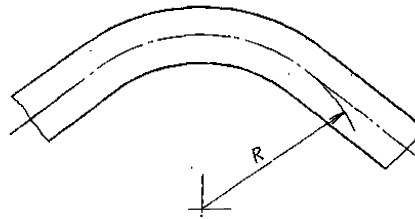



Рис. П5.4. Криволинейная труба

Напряжения $\sigma_{zp}$ и $\sigma_{\psi p}$ определяют по формуле п. 2.3.1.1, коэффициенты $\gamma_m$, $\beta_m$ — по разд. 2.6.

2.4.2.4. Для тройникового узла определяют составляющие напряженного состояния по формулам:

для сечений $A—A$ и $B—B$ (рис. П5.1)

$$\sigma_\psi = 1{,}5\sigma_{\psi p};$$

$$\sigma_z = \sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN(s)} K_{и(s)} + \sigma_{zp},$$

для сечения $Б—Б$

$$\sigma_\psi = \sigma_{\psi p} \pm \sigma^0_{zMN(s)} K_{и(s)};$$

$$\sigma_z = 1{,}5\sigma^0_{zMN} + \sigma_{zp}.$$

Величины $\sigma_{zp}$, $\sigma_{\psi p}$, $\sigma^0_{zMN}$, $\sigma^0_{zMN(s)}$, $\tau$ определяют таким же образом, как требуется согласно п. 2.3.2.1. Величину $K_{и(s)}$ вычисляют согласно разд. 2.7.

2.4.3. Критерии прочности.

2.4.3.1. Проверку прочности по категориям напряжений $(\sigma)_2$ и $(\sigma)_{RK}$ проводят по разд. 5.4 Норм, а по категории $(\sigma_{aF})_K$ — по разд. 5.6 Норм.

## 2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОДАТЛИВОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРУБЫ

2.5.1. Коэффициент податливости криволинейной трубы (рис. П5.4) вычисляют как произведение коэффициента податливости $K_p$, определяемого без учета стесненности деформации ее концов от влияния примыкающих труб, на коэффициент $\zeta$, учитывающий эту стесненность деформации, т. е.

$$K^*_p = \zeta K_p.$$

2.5.2. Коэффициент податливости $K_p$ определяют по формуле

$$K_p = 1 + 1{,}125/b.$$

Величину $b$ вычисляют по следующим формулам:

Таблица П5.5. Зна

| λ | Угол между концевыми | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | | | | 30 | | | |
| | R/r | | | | R/r | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,28 |
| 0,2 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,27 | 0,34 | 0,39 | 0,42 |
| 0,4 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,43 | 0,48 | 0,52 | 0,54 |
| 0,6 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,55 | 0,59 | 0,61 | 0,62 |
| 0,8 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,63 | 0,66 | 0,68 | 0,69 |
| 1,0 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,72 | 0,74 | 0,75 | 0,76 |
| 1,2 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,84 |
| 1,4 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,91 |
| 1,65 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

$$a_1 = 1{,}0100 + 1633{,}5\lambda^2 + 99{,}00\omega;$$

$$a = 1{,}0156 + 661{,}5\lambda^2 + 63{,}00\omega - \frac{0{,}2316}{a_1};$$

$$a_3 = 1{,}0278 + 204{,}2\lambda^2 + 35{,}00\omega - \frac{0{,}2197}{a_2};$$

$$a_4 = 1{,}0625 + 37{,}5\lambda^2 + 15{,}00\omega - \frac{0{,}1914}{a_3};$$

$$b = 0{,}1250 + 1{,}5\lambda^2 + 3{,}00\omega - \frac{0{,}09766}{a_4}.$$

Параметры $\lambda$ и $\omega$ вычисляют по формулам

$$\lambda = \frac{Rs}{r^2}; \quad \omega = 1{,}82\frac{p}{E}\frac{R^2}{sr}.$$

2.5.3. Коэффициент $\zeta$ определяют способом линейной интерполяции по данным табл. П5.5.

### 2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРУБЫ

2.6.1. Коэффициенты интенсификации напряжений $\gamma_m$ и $\beta_m$ определяют по формулам

$$\gamma_m = 0{,}75\lambda \sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\left(1 - i^2\right);$$

чения коэффициента $\zeta$

сечениями трубы, град

| 60 | | | | 90 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R/r$ | | | | $R/r$ | | | |
| 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,25 | 0,37 | 0,47 | 0,55 | 0,42 | 0,58 | 0,65 | 0,70 |
| 0,43 | 0,56 | 0,66 | 0,73 | 0,60 | 0,78 | 0,84 | 0,88 |
| 0,62 | 0,73 | 0,80 | 0,84 | 0,77 | 0,88 | 0,91 | 0,93 |
| 0,73 | 0,81 | 0,85 | 0,88 | 0,82 | 0,90 | 0,94 | 0,95 |
| 0,77 | 0,84 | 0,88 | 0,90 | 0,85 | 0,92 | 0,93 | 0,94 |
| 0,83 | 0,88 | 0,91 | 0,93 | 0,89 | 0,94 | 0,96 | 0,96 |
| 0,88 | 0,91 | 0,94 | 0,95 | 0,92 | 0,95 | 0,97 | 0,97 |
| 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

$$\beta_m = K_p + 1{,}5 \sum_{i=2,4,\ldots}^{10} \frac{A_{i2}}{i},$$

где $A_{22} = -\frac{1}{b}$; $A_{42} = \frac{0{,}3125}{a_4} A_{22}$; $A_{62} = \frac{0{,}4375}{a_3} A_{42}$; $A_{82} = \frac{0{,}4687}{a_2} A_{62}$; $A_{10\,2} = \frac{0{,}4812}{a_1} A_{82}$.

Величины $K_p$, $a_1$, $a_2$, $a_3$, $a_4$, $b$ определяют формулами разд. 2.5.

### 2.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗГИБА ДЛЯ ТРОЙНИКОВОГО УЗЛА

2.7.1. При $\frac{D_{as} - s_s}{2s} \leqslant 8$ (рис. П5.5) коэффициент местных напряжений $K_{и(s)}$ вычисляют по формуле

$$K_{и(s)} = \frac{(D_{as} - s_s) s_s}{4 (s - c)^2} \ln \frac{D_a - s}{s'_s}.$$

Размер $s'_s$ определяют по рис. П5.5.

2.7.2. При $\frac{D_{as} - s_s}{2s} > 8$

$$K_{и(s)} = \frac{6{,}2 (D_{as} - s_s) s_s s}{(s - c)^2 (D_{as} + 10s - s_s)} \ln \frac{D_a - s}{s'_s}.$$

2.7.3. Если значение $K_{и(s)}$, подсчитанное по формуле п. 2.7.1 или 2.7.2, меньше 2, то следует принимать $K_{и(s)} = 2$.

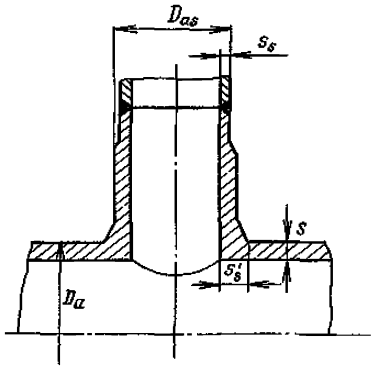



Рис. П5.5. Тройниковый узел

### 2.8. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРУБЕ ПО УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКЕ

2.8.1. Труба кругового сечения.

2.8.1.1. Вычисляют нормальные напряжения от изгиба трубы без учета деформирования поперечного сечения:

$$\sigma^{0a}_{z(x)} = M_x/W; \quad \sigma^{0a}_{z(y)} = M_y/W;$$

$$\sigma^{0}_{z(x)} = \sigma^{0a}_{z}/\beta; \quad \sigma^{0}_{z(y)} = \sigma^{0a}_{z(y)}/\beta,$$

где $\beta = D_a/D$. Здесь и далее индекс $a$ обозначает наружную поверхность. (Направление моментов см. на рис. П5.3.)

2.8.1.2. Вычисляют напряжения, вызываемые крутящим моментом, внутренним давлением и осевой силой:

$$\tau^a = M_z/(2W); \quad \tau = \tau^a/\beta;$$

$$\sigma_{zp} = \frac{p\left[D_a - 2(s - c_{11} - c_2)\right]^2}{4(D_a - s + c_{11} + c_2)(s - c_{11} - c_2)};$$

$$\sigma^a_{\psi p} = \frac{2\sigma_{zp}}{\varphi}\,\frac{4R + D_a \sin\psi}{4R + 2D_a \sin\psi}\,\frac{s - c_{11} - c_2}{s - c_1 - c_2};$$

$$\sigma_{\psi p} = \frac{2\sigma_{zp}}{\varphi}\left(\frac{4R + (D_a - 2s)\sin\psi}{4R + 2(D_a - 2s)\sin\psi} + \frac{p}{2\sigma_{zp}}\right)\frac{s - c_{11} - c_2}{s - c_1 - c_2};$$

$$\sigma_{zN} = \frac{N_z}{\pi(D_a - s + c_{11} + c_2)(s - c_{11} - c_2)},$$

где $s$ — минимальная толщина стенки вследствие технологических операций; $\varphi$ — см. п. 2.3.1.1; $\psi$ — см. рис. П5.3.

2.8.1.3. Вычисляют изгибные напряжения с учетом деформирования поперечного сечения:

$$\sigma^a_{zM} = \sigma^{0a}_{z(x)}\beta^a_1 + \sigma^{0a}_{z(y)}\beta^a_2;$$

$$\sigma_{zM} = \sigma^0_{z(x)}\beta_1 + \sigma^0_{z(y)}\beta_2;$$

$$\sigma^a_{\psi M} = \left(\sigma^{0a}_{z(x)}\gamma^a_1 + \sigma^{0a}_{z(y)}\gamma^a_2\right)\frac{\beta+1}{2\beta};$$

$$\sigma_{\psi M} = \left(\sigma^{0a}_{z(x)}\gamma_1 + \sigma^{0a}_{z(y)}\gamma_2\right)\frac{\beta+1}{2\beta},$$

где

$$\beta^a_1 = K_p \sin\psi - \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^a_{1i};$$

$$\beta_1 = K_p \sin\psi - \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi_{1i};$$

$$\beta^a_2 = K_p \cos\psi + \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^a_{2i};$$

$$\beta_2 = K_p \cos\psi + \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi_{2i};$$

$$\gamma^a_1 = 0{,}3K_p \sin\psi - 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^a_{3i};$$

$$\gamma_1 = 0{,}3K_p \sin\psi - 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi_{3i};$$

$$\gamma^a_2 = 0{,}3K_p \cos\psi + 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^a_{4i};$$

$$\gamma_2 = 0{,}3K_p \cos\psi + 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi_{4i},$$

причем (заменяем для краткости $i$ и $j$ одной буквой $\nu$)

$$\Phi_{1\nu} = \sin\psi\cos\nu\psi - \frac{1}{\nu}\cos\psi\sin\nu\psi \pm 0{,}15\lambda\left(1-\nu^2\right)\cos\nu\psi;$$

$$\Phi_{2\nu} = \sin\psi\sin\nu\psi + \frac{1}{\nu}\cos\psi\cos\nu\psi \pm 0{,}15\lambda\left(1-\nu^2\right)\sin\nu\psi;$$

$$\Phi_{3\nu} = \sin\psi\cos\nu\psi - \frac{1}{\nu}\cos\psi\sin\nu\psi \pm \frac{\lambda}{0{,}6}\left(1-\nu^2\right)\cos\nu\psi;$$

$$\Phi_{4\nu} = \sin\psi\sin\nu\psi + \frac{1}{\nu}\cos\psi\cos\nu\psi \pm \frac{\lambda}{0{,}6}\left(1-\nu^2\right)\sin\nu\psi,$$

где верхний знак соответствует внутренней поверхности, а нижний — наружной.

Значения $K_p$ и $A_{i2}$ определяют согласно пп. 2.5.2 и 2.6.1.

2.8.1.4. Вычисляют тангенциальные мембранные напряжения от изгиба трубы:

$$\bar{\sigma}_\psi = \left(\sigma^{0a}_{z(x)}\gamma_3 + \sigma^{0a}_{z(y)}\gamma_5\right)\frac{r}{R}\,\frac{\beta+1}{2\beta},$$

где $\gamma_3 = \cos\psi\left(-K_p\cos\psi + \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^0_{1i}\right);$

$$\gamma_5 = K_p\sin\psi\cos\psi\left(1 - \frac{3+2\sin^2\psi}{5+6\lambda^2+12\omega}\right),$$

причем

$$\Phi^0_{1i} = \frac{1}{2i}\left[\frac{1+i}{1-i}\cos(1-i)\psi - \frac{1-i}{1+i}\cos(1+i)\psi\right].$$

2.8.1.5. Вычисляют суммарные нормальные напряжения на взаимно перпендикулярных площадках:

$$\sigma^a_z = \sigma^a_{zM} + \sigma_{zN} + \sigma_{zp};\quad \sigma^a_\psi = \sigma^a_{\psi M} + \bar{\sigma}_\psi + \sigma^a_{\psi p};$$

$$\sigma_z = \sigma_{zM} + \sigma_{zN} + \sigma_{zp};\quad \sigma_\psi = \sigma_{\psi M} + \bar{\sigma}_\psi + \sigma_{\psi p}.$$

2.8.1.6. Определяют приведенные напряжения на внутренней и наружной поверхностях трубы для следующей последовательности значений угла $\psi$: $\psi_n = nh_\psi$, $n = 0, 1, 2, \ldots, 35$, где шаг изменения угла $h_\psi = 2\pi/36$.

Радиальное нормальное напряжение для внутренней поверхности $\sigma_r = -p$, а для наружной поверхности $\sigma^a_r = 0$.

2.8.2. Труба овального сечения.

2.8.2.1. Предполагается, что поперечное сечение трубы имеет эллиптическую (овальную) форму, причем большая ось сечения расположена перпендикулярно плоскости оси трубы. Радиальные отклонения контура такого сечения от окружности радиуса $r$ выражаются уравнением (рис. П5.3)

$$\Delta(\psi) = \frac{a}{400}D_н\cos 2\psi,$$

где $a$ — овальность сечения ($a \leqslant 10\%$).

2.8.2.2. Вычисляют нормальные напряжения, обусловленные начальной овальностью сечения для внутренней и наружной поверхностей:

$$\sigma_{z\text{э}} = -p\frac{R}{r}\frac{D_a}{s}\frac{a}{100}\beta_{1\text{э}};$$

$$\sigma_{\psi э} = p\frac{D_a}{s}\frac{a}{100}\left(-\frac{R}{r}\gamma_{1э}+\gamma_{3э}\right),$$

где $\beta_{1э}=\beta_1-\sin\psi$; $\gamma_{1э}=\gamma_1-0{,}3\sin\psi$; $\gamma_{3э}=-\gamma_3-\cos^2\psi$.

Определение $\beta_1$, $\gamma_1$ для внутренней и наружной поверхностей — см. п. 2.8.1.3, а определение $\gamma_3$ — см. п. 2.8.1.4.

2.8.2.3. Для учета напряжений, определяемых согласно п. 2.8.2.2, проводят суммирование их с напряжениями п. 2.8.1.5, а затем определяют приведенные напряжения в точках, указанных в п. 2.8.1.6.

2.8.3. Особенности расчета напряжений различных категорий.

2.8.3.1. При определении напряжений категорий $(\sigma)_{RK}$ и $(\sigma_{aF})_K$ для низкотемпературных трубопроводов принимают $\varphi=1$. При вычислении приведенных напряжений категории $(\sigma_{aF})_K$ напряжения изгиба, определяемые согласно п. 2.8.1.3, умножают на коэффициент 0,7. При подсчете напряжений категории $(\sigma)_{RK}$ для высокотемпературных трубопроводов значение коэффициента $\varphi$ принимают по разд. 4.3 Норм, изгибные напряжения п. 2.8.1.3 умножают на коэффициент 0,6, а изгибные напряжения п. 2.8.2.2 — на коэффициент $\chi_э$, где значение $\chi_э$ принимают по п. 2.4.2.3.

### 2.9. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРОЙНИКОВОМ СОЕДИНЕНИИ ПО УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКЕ

2.9.1. Для тройниковых соединений низкотемпературных трубопроводов, образованных пересечением двух круглоцилиндрических оболочек постоянной толщины (штуцера и трубы с диаметрами срединной поверхности $d_m$, $D_m$ и толщинами $s_s$, $s$), оси которых пересекаются под прямым углом, уточненный расчет напряженного состояния проводят на совместное действие внутреннего давления и значимых нагрузок в торцевых сечениях тройника: осевых сил, изгибающих и крутящих моментов (рис. П5.6, П5.7). Методика применима и к соединениям, близким к упомянутым по геометрической форме, охватывает диапазон тройников от тонкостенных ($s_s/d_m$, $s/D_m=0{,}01$) до толстостенных ($s_s/d_m$, $s/D_m=0{,}15$), от равнопроходных ($D_m/d_m=1$) до существенно неравнопроходных ($D_m/d_m\gg1$), от равностенных ($s_s=s$) до весьма неравностенных ($s=2s_sD_m/d_m$), включая «равнопрочные» ($s_s/d_m=s/D_m$). Реальная геометрия сварного шва при расчете сварного тройника не учитывается (в запас прочности).

2.9.2. Исходными данными для проведения расчета напряжений в тройнике являются значения следующих величин (в согласованных единицах измерения, рис. П5.6, П5.7): $s_s$ — толщина стенки отвода (штуцера); $s$ — толщина стенки трубы

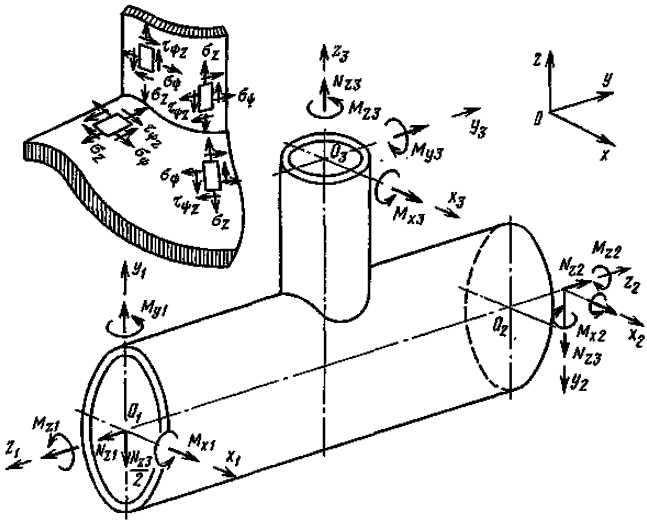


Рис. П5.6. Положительные направления силовых факторов

(корпуса); $d_m$ — диаметр срединной поверхности отвода ($d_m = 2r_m = d_a - s_s$); $D_m$ — диаметр срединной поверхности трубы ($D_m = 2R_m = D_a - s$); $p$ — внутреннее давление; $N_{z3}$, $M_{x3}$, $M_{y3}$, $M_{z3}$ — нагрузки в сечении отвода *3—3*: осевая сила, изгибающий момент в плоскости тройника, изгибающий момент из плоскости тройника, крутящий момент; $N_{za}$, $M_{xa}$, $M_{ya}$, $M_{za}$ — осевая сила, момент в плоскости тройника, момент из плоскости тройника и крутящий момент в сечениях трубы *1—1* ($\alpha = 1$) и *2—2* ($\alpha = 2$).

Силовые факторы $N_{zi}$, $M_{xi}$, $M_{yi}$, $M_{zi}$ ($i = 1, 2, 3$), положительные направления которых показаны на рис. П5.6, определяют для соответствующих сечений (рис. П5.7) из расчета трубопроводной системы и удовлетворяют условиям равновесия:

$$M_{x1} + M_{x2} + M_{x3} = 0;$$
$$M_{y1} - M_{y2} + M_{z3} = 0;$$
$$M_{z1} - M_{z2} - M_{y3} = 0.$$

Самоуравновешенные нагрузки в торцевых сечениях трубы (1—1 и *2—2*), фигурирующие в формулах п. 2.9.3 методики, вычисляют следующим образом:

$$N_z = (N_{z1} + N_{z2})/2;$$
$$M_x = (M_{x1} - M_{x2})/2;$$

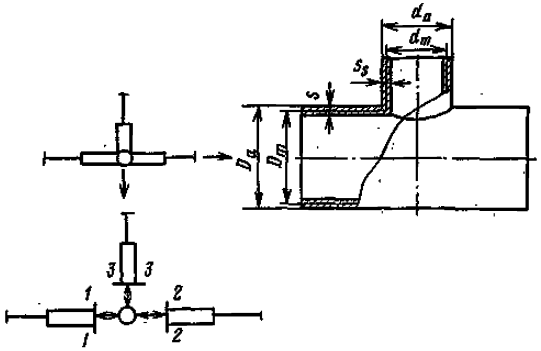



Рис. П5.7. Расчетные сечения тройникового соединения

$$M_y=(M_{y1}+M_{y2})/2;$$
$$M_z=(M_{z1}+M_{z2})/2.$$

2.9.3. Ниже приводятся формулы и номограммы для вычисления компонентов напряженного состояния $\sigma_\psi$, $\sigma_z$, $\sigma_r$ и $\tau$ (их ориентация показана на рис. П5.6) в трех сечениях тройника, определяющих его прочность. Для равнопроходных и близких к ним тройников ($D_m/d_m<1{,}3$) расчет проводят, кроме того, по дополнительным формулам, учитывающим особенности распределения напряжений у этого класса тройников. Для оценки прочности берут большее из полученных значений приведенных напряжений.

2.9.3.1. Компоненты напряженного состояния $\sigma_\psi$ и $\sigma_z$ для группы напряжений $(\sigma)_2$ определяют по следующим формулам:

$$\begin{cases} \sigma_\psi=\sigma_{\psi p}+\left(1-\dfrac{d_m}{D_m}\right)\dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}-\dfrac{N_z}{A_s}-\dfrac{M_x}{W}\pm\dfrac{\gamma_\psi^{(4)}}{2}\dfrac{M_{x3}}{W_3}; \\ \sigma_z=\sigma_{zp}+\left(1-\dfrac{d_m}{D_m}\right)\dfrac{\gamma_z^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}\pm\dfrac{\gamma_z^{(4)}}{2}\dfrac{M_{x3}}{W_3}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_\psi=\sigma_{\psi p}+\dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\pm\left(\dfrac{\gamma_\psi^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right); \\ \sigma_z=\sigma_{zp}+\dfrac{\gamma_z^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}\pm\dfrac{\gamma_z^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \sigma_{\psi p} + 0{,}7\left(\dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\right) \pm \\ \pm\sqrt{\left(\dfrac{\gamma_\psi^{(4)}M_{x3}}{2W_3}\right)^2 + \left(\dfrac{\gamma_\psi^{(5)}M_{y3}}{2W_3} + \gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right)^2}; \\ \sigma_z = \sigma_{zp} + 0{,}35\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} \pm \dfrac{1}{2W_3}\sqrt{\left(\gamma_z^{(4)}M_{x3}\right)^2 + \left(\gamma_z^{(5)}M_{y3}\right)^2}. \end{cases}$$

При соотношении $D_m/d_m < 1{,}3$ дополнительно вычисляют следующие напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \sigma_{\psi p} + \dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W} \pm \left(\left|\dfrac{\gamma_\psi^{(4)}}{2}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right| + \right. \\ \left. + \left|\dfrac{\gamma_\psi^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3} + \gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right| + \dfrac{1}{4}\left|\gamma_\psi^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{W} - \gamma_\psi^{(8)}\dfrac{M_z}{W}\right|\right); \\ \sigma_z = \sigma_{zp} + \dfrac{1}{2}\left(\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_z^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \gamma_z^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\right) \pm \dfrac{1}{2}\left(\left|\gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right| + \right. \\ \left. + \left|\gamma_z^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3} + \gamma_z^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right| + \dfrac{1}{2}\left|\gamma_z^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{W_3} - \gamma_z^{(8)}\dfrac{M_z}{W}\right|\right). \end{cases}$$

Радиальные напряжения $\sigma_r$ принимают

$$\sigma_r = -0{,}5p;$$

касательные напряжения $\tau$ определяют по формуле

$$\tau = \frac{M_{z3}}{2W_3} - \frac{M_z}{2W}.$$

$\sigma_{\psi p}$ и $\sigma_{zp}$ вычисляют по формуле п. 2.3.1.1 ($D_a = D + s$); $A_s$ и $A_{s3}$ — площади поперечного сечения трубы и штуцера; $W$ и $W_3$ — соответствующие моменты сопротивления. Коэффициенты местных напряжений $\gamma_\psi^{(i)}$ и $\gamma_z^{(i)}$ ($i = 1, 2, \ldots, 8$) определяют согласно п. 2.9.3.4, силовые факторы в трубе $N_z$, $M_x$, $M_y$, $M_z$ — по формулам п. 2.9.2 от массовых и других механических нагрузок.

2.9.3.2. Составляющие группы напряжений $(\sigma)_{RK}$ вычисляют по следующим формулам (от давления, механических и температурных воздействий):

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \dfrac{\alpha_\sigma}{2}\sigma_{\psi p} + \left(1 - \dfrac{d}{D}\right)\dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} - \dfrac{N_z}{A_s} - \dfrac{M_x}{W} \pm \dfrac{\gamma_\psi^{(4)}}{2}\dfrac{M_{x3}}{W_3}; \\ \sigma_z = \dfrac{\sigma_{\psi p}}{2} + \left(1 - \dfrac{d}{D}\right)\dfrac{\gamma_z^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} \pm \gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{2W_3}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \sigma_{\psi p} + \dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W} \pm \left(\dfrac{\gamma_\psi^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3} + \gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right); \\ \sigma_z = \dfrac{\sigma_{\psi p}}{2} + \dfrac{\gamma_z^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} \pm \dfrac{\gamma_z^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \sigma_{\psi p}\left[1 + \left(\dfrac{\alpha_\sigma}{2} - 1\right)\delta\right] + \left(1 - \dfrac{d}{D}\delta\right)\left(\dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \right. \\ \left. + \gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\right) \pm \sqrt{\left(\dfrac{\gamma_\psi^{(4)}}{2}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right)^2 + \left(\dfrac{\gamma_\psi^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3} + \gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right)^2}; \\ \sigma_z = \dfrac{\sigma_{\psi p}}{2} + \left(1 - \dfrac{d}{D}\delta\right)\dfrac{\gamma_z^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} \pm \dfrac{1}{2}\sqrt{\left(\gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right)^2 + \left(\gamma_z^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}\right)^2}. \end{cases}$$

При $D_m/d_m < 1{,}3$ дополнительно определяют напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_\psi = \dfrac{\alpha_\sigma}{2}\sigma_{\psi p} + \dfrac{\gamma_\psi^{(1)}}{2}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W} \pm \left(\left|\dfrac{\gamma_\psi^{(4)}}{2}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right| + \left|\dfrac{\gamma_\psi^{(5)}}{2}\dfrac{M_{y3}}{W_3} + \right.\right. \\ \left.\left. + \gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right| + \dfrac{1}{4}\left|\gamma_\psi^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{W_3} - \gamma_\psi^{(8)}\dfrac{M_z}{W}\right|\right); \\ \sigma_z = \dfrac{\sigma_{\psi p}}{2} + \dfrac{1}{2}\left(\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}} + \gamma_z^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s} + \gamma_z^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\right) \pm \dfrac{1}{2}\left(\left|\gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right| + \left|\gamma_z^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3} + \right.\right. \\ \left.\left. + \gamma_z^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right| + \dfrac{1}{2}\left|\gamma_z^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{W_3} - \gamma_z^{(8)}\dfrac{M_z}{W}\right|\right). \end{cases}$$

Радиальные напряжения $\sigma_r = 0$; напряжения кручения определяют по формуле

$$\tau = \frac{1}{2}\left(\frac{\gamma_{\psi z}^{(7)} M_{z3}}{W_3} - \frac{\gamma_{\psi z}^{(8)} M_z}{W}\right).$$

*Коэффициенты местных напряжений* $\gamma_\psi^{(i)}$, $\gamma_z^{(i)}$, $\gamma_{\psi z}^{(i)}$ ($i = 1, 2, \ldots, 8$) находят согласно п. 2.9.3.4, коэффициент $\alpha_\sigma$ вычисляют по формуле п. 2.3.2.3:

$$\alpha_\sigma = 1{,}2\left[2+2\left(\frac{D_m-s}{D_m+s}\right)^2-\left(\frac{D_m-s}{D_m+s}\right)^4\right];$$

$\sigma_{\psi p}$ — по формуле п. 2.3.2.1.

Параметр

$$\delta=\frac{|\gamma_z^{(4)}M_{x3}|}{\sqrt{(\gamma_z^{(4)}M_{x3})^2+(\gamma_z^{(5)}M_{y3}+\gamma_z^{(6)}M_yW_3/W)^2}}$$

Смысл остальных величин пояснен в п. 2.9.3.1.

2.9.3.3. Составляющие приведенных напряжений (амплитудные значения) определяют по формулам (от давления, механических и температурных воздействий)

$$\begin{cases}\sigma_\psi=\dfrac{1}{2}\left[\gamma_\psi^{(p)}\sigma_{\psi p}+\left(1-\dfrac{d_m}{D_m}\right)\left(\gamma_\psi^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\right)\pm\gamma_\psi^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right];\\ \sigma_z=\dfrac{1}{2}\left[\gamma_z^{(p)}\sigma_{\psi p}+\left(1-\dfrac{d_m}{D_m}\right)\left(\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_z^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_z^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\right)\pm\gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right];\end{cases}$$

$$\begin{cases}\sigma_\psi=\dfrac{1}{2}\left[\sigma_{\psi p}+\gamma_\psi^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\pm\left(\gamma_\psi^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right)\right];\\ \sigma_z=\dfrac{1}{2}\left[\dfrac{\sigma_{\psi p}}{2}+\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_z^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_z^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\pm\left(\gamma_z^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_z^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right)\right];\end{cases}$$

$$\begin{cases}\sigma_\psi=\dfrac{1}{2}\left\{\left[1+(\gamma_\psi^{(p)}-1)\delta\right]\sigma_{\psi p}+\left(1-\dfrac{d_m}{D_m}\delta\right)\left(\gamma_\psi^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\right.\right.\\ +\gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\Big)\pm\left(\delta\left|\gamma_\psi^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right|+\sqrt{1-\delta^2}\left|\gamma_\psi^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right|+\\ \left.\left.+\delta\sqrt{1-\delta^2}\left|\gamma_\psi^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{W_3}-\gamma_\psi^{(8)}\dfrac{M_z}{W}\right|\right)\right\};\\ \sigma_z=\dfrac{1}{2}\left\{\left[\dfrac{1}{2}+\left(\gamma_z^{(p)}-\dfrac{1}{2}\right)\delta\right]\sigma_{\psi p}+\left(1-\dfrac{d_m}{D_m}\delta\right)\left(\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_z^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\right.\right.\\ +\gamma_z^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\Big)\pm\left(\delta\left|\gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right|+\sqrt{1-\delta^2}\left|\gamma_z^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_z^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right|+\\ \left.\left.+\delta\sqrt{1-\delta^2}\left|\gamma_z^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{W_3}-\gamma_z^{(8)}\dfrac{M_z}{W}\right|\right)\right\}.\end{cases}$$

При $D_m/d_m<1{,}3$ дополнительно вычисляют следующие напряжения:

$$
\begin{cases}
\sigma_\psi = \dfrac{1}{2}\left\{\left[1+\left(\gamma_\psi^{(p)}-1\right)\delta\right]\sigma_{\psi p}+\gamma_\psi^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_\psi^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_\psi^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\pm\right. \\
\left.\pm\left(\left|\gamma_\psi^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right|+\left|\gamma_\psi^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_\psi^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right|+\left|\gamma_\psi^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{2W_3}-\gamma_\psi^{(8)}\dfrac{M_z}{2W}\right|\right)\right\}; \\
\sigma_z = \dfrac{1}{2}\left\{\left[\dfrac{1}{2}+\left(\gamma_z^{(p)}-\dfrac{1}{2}\right)\delta\right]\sigma_{\psi p}+\gamma_z^{(1)}\dfrac{N_{z3}}{A_{s3}}+\gamma_z^{(2)}\dfrac{N_z}{A_s}+\gamma_z^{(3)}\dfrac{M_x}{W}\pm\right. \\
\left.\pm\left(\left|\gamma_z^{(4)}\dfrac{M_{x3}}{W_3}\right|+\left|\gamma_z^{(5)}\dfrac{M_{y3}}{W_3}+\gamma_z^{(6)}\dfrac{M_y}{W}\right|+\left|\gamma_z^{(7)}\dfrac{M_{z3}}{2W_3}-\gamma_z^{(8)}\dfrac{M_z}{2W}\right|\right)\right\}.
\end{cases}
$$

Входящие в формулы величины имеют тот же смысл, что и в п. 2.9.3.2, напряжения кручения $\tau$ уменьшают в 2 раза, $\sigma_r = 0$.

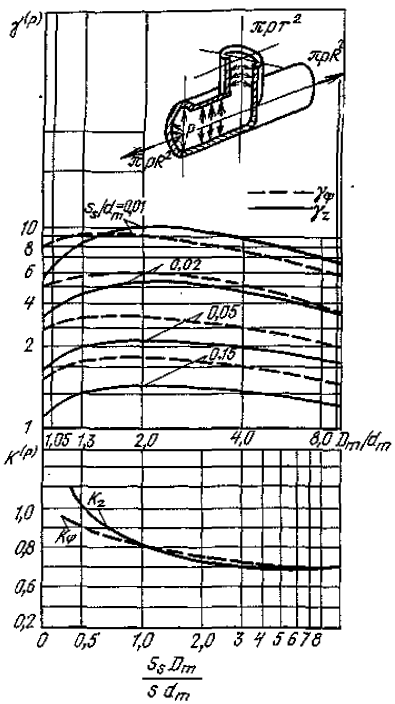



Рис. П5.8. Номограммы для определения коэффициентов $\gamma^{(p)}$ и $K^{(p)}$

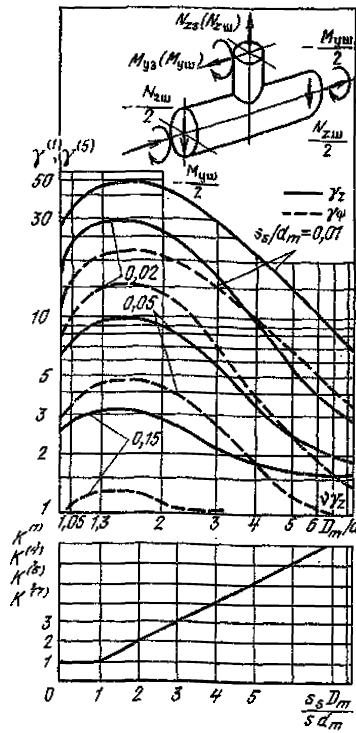



Рис. П5.9. Номограммы для определения коэффициентов $\gamma^{(1)}$, $\gamma^{(5)}$, $K^{(1)}$, $K^{(4)}$, $K^{(5)}$ и $K^{(7)}$

2.9.3.4. Коэффициенты местных напряжений $\gamma_\psi^{(i)}$, $\gamma_z^{(i)}$, $\gamma_{\psi z}^{(i)}$ ($i=p$, 1, 4, 5, 7) определяют по формуле

$$\gamma^{(i)}(s_s/d_m,\ s/D_m,\ D_m/d_m) = K^{(i)}(s_s D_m/s d_m)\gamma^{i}(s_s/d_m,\ D_m/d_m),$$

коэффициенты $K^{(i)}$, $\gamma_\psi^i$, $\gamma_z^i$, $\gamma_{\psi z}^i$, $\gamma_\psi^{(j)}$, $\gamma_z^{(j)}$ и $\gamma_{\psi z}^{(j)}$ ($j=2$, 3, 6, 8) — по номограммам, приведенным на рис. П 5.8 — П 5.14. Для равнопрочных и близких к ним тройников ($s_s/d_m \approx s/D_m$) следует принимать $K^{(i)}=1$. Коэффициенты $\gamma(s_s/d_m,\ D_m/d_m)$ для «промежуточных» значений $s_s/d_m$ ($s_{s1}/d_{m1} < s_s/d_m < s_{s2}/d_{m2}$) определяются линейной интерполяцией по коэффициентам $\gamma_1(s_{s1}/d_{m1},\ D_m/d_m)$ и

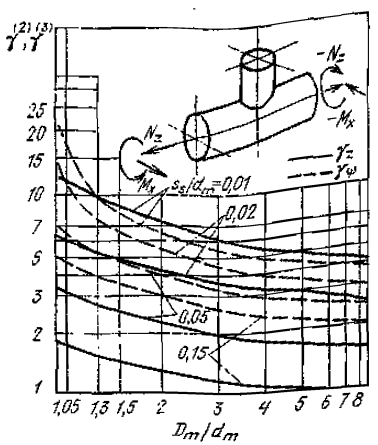



Рис. П5.10. Номограммы для определения коэффициентов $\gamma^{(2)}$ и $\gamma^{(3)}$

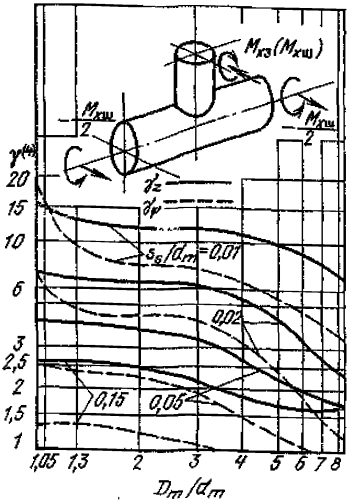



Рис. П5.11. Номограммы для определения коэффициента $\gamma^{(4)}$

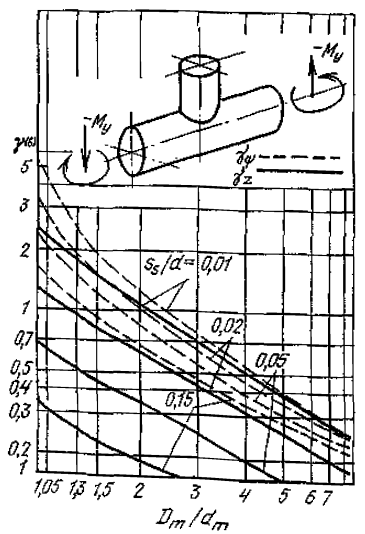



Рис. П5.12. Номограммы для определения коэффициента $\gamma^{(6)}$

$\leftarrow$

$\gamma_2(s_{s2}/d_{m2},\ D_m/d_m)$:

$$\gamma=\gamma_1+\frac{\gamma_2-\gamma_1}{\frac{s_{s2}}{d_{m2}}-\frac{s_{s1}}{d_{m1}}}\left(\frac{s_s}{d_m}-\frac{s_{s1}}{d_{m1}}\right).$$

Для всех тройников должны выполняться условия

$$\gamma_z^{(1)},\quad \gamma_z^{(4)},\quad \gamma_z^{(5)}\geqslant 1+\frac{3\nu}{\sqrt{3(1-\nu^2)}};$$

$$\gamma_{\psi z}^{(7)}\geqslant 1.$$

Для существенно неравнопроходных тройников ($D_m/d_m\geqslant 8$) допускается принимать $\gamma_\psi^{(6)}=\gamma_z^{(6)}=0$ при любых соотношениях $s/D_m$ и $s_s/d_m$;

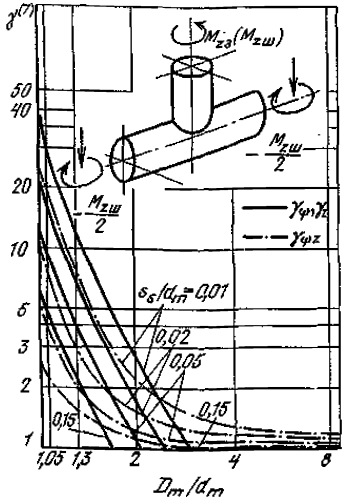



Рис. П5.13. Номограммы для определения коэффициента $\gamma^{(7)}$

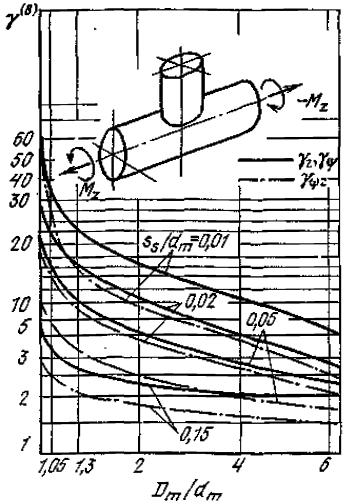



Рис. П5.14. Номограммы для определения коэффициента $\gamma^{(8)}$

$$\gamma_z^{(1)}=\gamma_z^{(4)}=\gamma_z^{(5)}=1+\frac{3\nu}{\sqrt{3(1-\nu^2)}};$$

$$\gamma_\psi^{(1)}=\gamma_\psi^{(4)}=\gamma_\psi^{(5)}=\nu\gamma_z^{(1)};$$

$$\gamma_\psi^{(2)}=\gamma_\psi^{(3)}=\gamma_z^{(2)}=\gamma_z^{(3)}=3;$$

$$\gamma_\psi^{(7)}=\gamma_z^{(7)}=0, \quad \gamma_{\psi z}^{(7)}=1;$$

$$\gamma_\psi^{(8)}=-\gamma_z^{(8)}=2, \quad \gamma_{\psi z}^{(8)}=0$$

при $s/D_m>2s_s/d_m$ ($\nu$ — коэффициент Пуассона).

### 2.10. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

2.10.1. Для режима нарушения нормальных условий эксплуатации должны быть выполнены требования пп. 2.3.1 и 2.3.4 при условии, что в расчет вводится максимальное давление для рассматриваемого режима, а допускаемое напряжение берется по п. 5.4 Норм.

2.10.2. При рассмотрении случаев нагружения, включающих действие сейсмических нагрузок, расчет напряжений проводят по формулам пп. 2.3.1 и 2.3.4. Допускаемые напряжения принимают в соответствии с п. 5.11 Норм.

2.10.3. Требуется проверка прочности трубопровода по напряжениям категории $(\sigma)_2$ для условий гидроиспытания. Расчет выполняют на совместное действие давления и массовой нагрузки. Условие прочности принимают по п. 5.4 Норм.

## 3. РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ СОСУДОВ

### 3.1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$F_{ob}$ — усилие, необходимое для обжатия прокладки, Н(кгс)
$F_{pr.p}$ — усилие на прокладку, обеспечивающее герметичность в рабочих условиях, Н (кгс)
$F_p$ — гидростатическое усилие в рабочих режимах, Н (кгс)
$F_{ph}$ — гидростатическое усилие при гидроиспытании, Н (кгс)
$p$ — расчетное давление, Па (кгс/мм$^2$)
$p_h$ — давление гидроиспытания, Па (кгс/мм$^2$)
$F_{ow}$ — усилие начальной затяжки шпилек, Н (кгс)
$F_w$ — усилие на шпильках, Н (кгс)
$F_{pr}$ — осевое усилие на прокладке, Н (кгс)
$Q_{pr}$ — радиальное усилие на клиновой прокладке, Н (кгс)
$F_T$ — усилие на шпильках, называемое температурными перепадами, Н (кгс)
$\chi$ — коэффициент нагрузки
$\lambda_{pr}$ — коэффициент податливости прокладки, мм/Н (мм/кгс)
$\lambda_r$ — коэффициент податливости рубашки корпуса, мм/Н (мм/кгс)
$\lambda_w$ — коэффициент податливости шпильки, мм/Н (мм/кгс)
$\lambda_b$ — коэффициент податливости втулки (шайбы), мм/Н (мм/кгс)
$E_r$ — модуль продольной упругости материала рубашки, Па (кгс/мм$^2$)
$E_w$ — модуль продольной упругости материала шпильки, Па (кгс/мм$^2$)
$E_{pr}$ — модуль продольной упругости материала прокладки, Па (кгс/мм$^2$)
$F_{pr.h}$ — усилие на прокладку, обеспечивающее герметичность при гидроиспытании, Н (кгс)
$\lambda_f$ — коэффициент податливости нажимного фланца, мм/Н (мм/кгс)
$E_f$ — модуль продольной упругости материала нажимного фланца, Па (кгс/мм$^2$)
$E_b$ — модуль продольной упругости материала втулки (шайбы), Па (кгс/мм$^2$)
$h_{pr}$ — расчетная высота прокладки, мм
$h_b$ — высота втулки (шайбы), мм
$A_b$ — площадь поперечного сечения втулки (шайбы), мм$^2$
$\Delta l_1$ — суммарное вертикальное температурное расширение корпуса и шпильки на отрезке между опорным буртом корпуса и нижним торцом гайки, мм

$\Delta l_2$ — суммарное вертикальное температурное расширение крышки, прокладки, нажимного фланца, втулки и бурта (для случая выполнения бурта на антикоррозионной рубашке) на отрезке между опорным буртом корпуса и нижним торцом гайки, мм

$D_{pr}$ — средний диаметр прокладки, мм

$z$ — число шпилек;

$b_1$ — расчетная ширина прокладки, мм

$b_0$ — условная ширина прокладки, мм

$b$ — эффективная ширина прокладки, мм

$h_1$ — высота клиновой прокладки, мм

$b_2$ — ширина конуса клиновой прокладки, мм

$b'_1$ — суммарная ширина проточек на прокладке или контактирующей поверхности на ширине $b_1$, мм

$b'_2$ — суммарная ширина проточек на конусе клиновой прокладки, мм

$h'_1$ — суммарная ширина проточек на цилиндрической поверхности клиновой прокладки, мм

$\alpha$ — угол конуса клиновой прокладки, град

$m$ — прокладочный коэффициент

$q_0$ — удельное давление на прокладке при обжатии, Па (кгс/мм$^2$)

$l$ — свободная длина шпильки — длина стержня шпильки между нижним торцом гайки и верхним концом корпуса, мм

$d_w$ — диаметр стержня шпильки, мм

$d_0$ — наружный диаметр резьбы шпильки, мм

$d_1$ — внутренний диаметр резьбы шпильки, мм

$A_w$ — площадь поперечного сечения стержня шпильки, мм$^2$

$W$ — момент сопротивления сечения стержня шпильки при изгибе, мм$^3$

$W_k$ — момент сопротивления сечения стержня шпильки при кручении, мм$^3$

$J$ — момент инерции сечения стержня шпильки при изгибе, мм$^4$

$M_k$ — крутящий момент, действующий на шпильку, Н·мм (кгс/мм)

$M_1$, $M_2$ — изгибающие моменты на шпильке, Н·мм (кгс·мм)

$w_1$ — радиальное перемещение торца фланца корпуса, мм

$w_2$ — радиальное перемещение нижнего торца гайки, мм

$\vartheta_1$ — угловое перемещение торца фланца корпуса, рад

$\vartheta_2$ — угловое перемещение нижнего торца гайки, рад

$\sigma_{mw}$ — напряжение растяжения в шпильках, Па (кгс/мм$^2$)

$\sigma_{bw}$ — напряжение изгиба в шпильках, Па (кгс/мм$^2$)

$\tau_{kw}$ — напряжение кручения в шпильках, Па (кгс/мм$^2$)

$h'$ — высота рабочей части резьбы (резьбового соединения), мм

$J_f$ — момент инерции сечения нажимного фланца относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести, мм$^4$

$R$ — радиус центра масс сечения нажимного фланца, мм

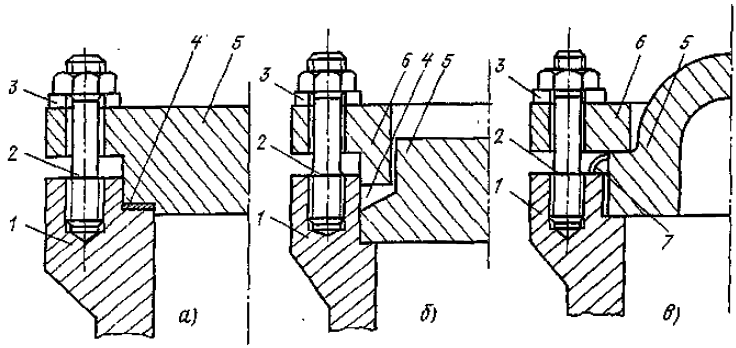



Рис. П5.15. Типовые конструкции фланцевых соединений:
*а*—с плоской прокладкой; *б*—с клиновой прокладкой; *в*—с гибким герметизирующим элементом: *1*—фланец корпуса; *2*—шпилька; *3*—втулка (шайба); *4*—прокладка; *5*—крышка; *6*—фланец корпуса; *7*—гибкий герметизирующий элемент

### 3.2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.2.1. Методика распространяется на разъемные соединения сосудов и аппаратов, работающих под внутренним давлением при температурах ниже $T_t$.

Типовые конструкции соединения показаны на рис. П5.15.

### 3.3. РАСЧЕТ РАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Рассчитывают усилия начальной затяжки шпилек, усилия в шпильках и на прокладке в условиях эксплуатации, а также напряжения в шпильках.

### 3.4. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА НАГРУЗКИ

3.4.1. Коэффициент нагрузки учитывает влияние внутреннего давления на усилия в шпильках и на прокладке предварительно затянутого соединения.

Коэффициент нагрузки определяют по формуле

$$\chi = \frac{\lambda_{pr} + \lambda_r}{\lambda_{pr} + \lambda_r + \lambda_w + \lambda_b + \lambda_f}.$$

3.4.2. Коэффициент податливости прокладки $\lambda_{pr}$ для случая, когда прокладку устанавливают между крышкой и опорным буртом корпуса, вычисляют по формуле

$$\lambda_{pr} = \frac{h_{pr}}{E_{pr} A_{pr}},$$

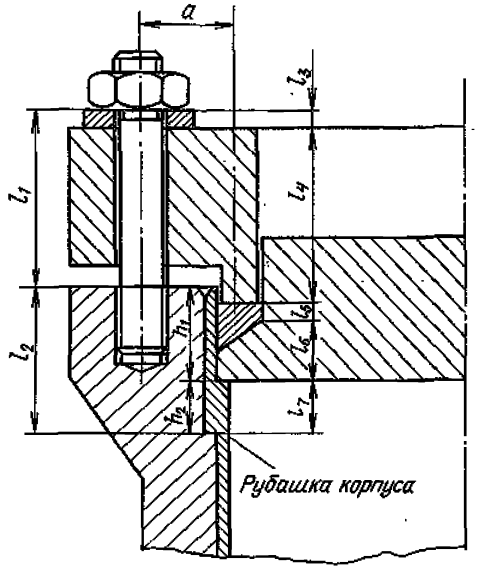



Рис. П5.16. Фланец корпуса с антикоррозионной рубашкой

где $A_{pr}=\pi D_{pr}b$ — площадь поперечного сечения прокладки.

Для клинового уплотнения и беспрокладочного соединения с гибким герметизирующим элементом принимают $\lambda_{pr}=0$.

3.4.3. Коэффициент податливости бурта корпуса $\lambda_r$ с антикоррозионной рубашкой (рис. П5.16) вычисляют по формуле

$$\lambda_r=\frac{h_1}{E_r\left(1+\frac{h_1}{h_2}\frac{A_2}{A_1}\right)A_1},$$

где $h_1$, $h_2$ — высота элемента рубашки; $A_1$, $A_2$ — площадь поперечного сечения элемента рубашки. Если бурт выполнен на корпусе, не имеющем рубашки, то принимают $\lambda_r=0$.

3.4.4. Коэффициент податливости шпильки $\lambda_w$, учитывающий податливость стержня шпильки и резьбового соединения шпилька — корпус и шпилька — гайка, вычисляют по формуле

$$\lambda_w=\frac{l+0{,}6d_w}{zE_wA_w}.$$

3.4.5. Коэффициент податливости втулки (шайбы) вычисляют по формуле

$$\lambda_b = \frac{h_b}{zE_bA_b}.$$

3.4.6. Коэффициент податливости нажимного фланца

$$\lambda_f = \frac{Ra^2}{2\pi E_f J_f},$$

где $a$ — размер, указанный на рис. П5.16.

### 3.5. РАСЧЕТ УСИЛИЙ В ШПИЛЬКАХ, ВЫЗВАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПЕРЕПАДАМИ

Усилия в шпильках, вызванные температурными перепадами в деталях соединения или различием коэффициентов линейного расширения материалов деталей соединения, определяют по формуле

$$F_T = \frac{\Delta l_2 - \Delta l_1}{\lambda_w + \lambda_b + \lambda_{pr} + \lambda_r + \lambda_f}.$$

Пример разбивки соединения по участкам для вычисления температурных расширений показан на рис. П5.16.

Для данного примера $\Delta l_1 = \alpha_1 l_1 T_1 + \alpha_2 l_2 T_2$; $\Delta l_2 = \alpha_3 l_3 T_3 + \alpha_4 l_4 T_4 + \alpha_5 l_5 T_5 + \alpha_6 l_6 T_6 + \alpha_7 l_7 T_7$, где $\alpha_i$, $l_i$, $T_i$ — коэффициент линейного расширения материала, длины участков и средние температуры на участке.

Коэффициенты податливости $\lambda_w$, $\lambda_b$, $\lambda_{pr}$, $\lambda_r$ и $\lambda_f$ вычисляют в соответствии с пп. 3.4.2—3.4.6.

### 3.6. РАСЧЕТ УСИЛИЙ НАЧАЛЬНОЙ ЗАТЯЖКИ ШПИЛЕК

3.6.1. Начальную затяжку соединения производят для устранения неплотности прилегания прокладки к контактирующим поверхностям и создания условий, обеспечивающих нераскрытие стыка и герметичность соединения во время гидроиспытаний, действия рабочего давления и температурных перепадов.

3.6.2. Усилие, необходимое для обжатия прокладки,

$$F_{0b} = \pi D_{pr} b q_0.$$

3.6.3. Усилие на прокладку (кроме клиновой самоуплотняющейся), обеспечивающее герметичность при рабочем давлении и гидроиспытании,

$$F_{pr.p} = \pi D_{pr} b m p;$$

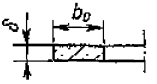
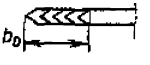
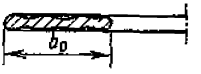
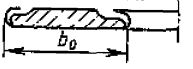
$$F_{pr.h} = \pi D_{pr} b m p_h.$$

Для клиновой самоуплотняющейся прокладки

$$F_{pr.p} = F_{pr.h} = 0.$$

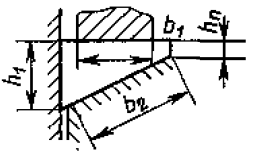
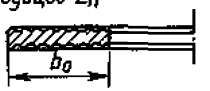
3.6.4. Значения $b$, $m$, $q_0$ выбирают из табл. П5.6.

Таблица П5.6. **Значения $b$, $m$ и $q_0$**

| Тип прокладки | Конструкция прокладки | Материал | Эффективная ширина $b$, мм |
|---|---|---|---|
| Мягкая | *Плоская*  | Резина твердая | $b_0$ |
| | | Фторопласт | |
| | | *Паронит* | $b_0$ при $b_0 \leqslant 10$<br>$\sqrt{10b_0}$ при $b_0 > 10$ |
| Комбинированная | *Спиральная*  | Перлитная сталь | |
| | *Гофрированная лента*  | Алюминий, *его сплавы* | $b_0$ |
| | | Медь, ее сплавы | |
| | | Перлитная сталь | |
| | *С наружной металлической оболочкой*  | Алюминий, его сплавы | |
| | | Медь, ее сплавы | |
| | | Перлитная сталь | |
| Металлическая | *Профильная (круг, овал, восьмигранник)*  | Медь, ее сплавы; никель, его сплавы | $0{,}6b_0$ |
| | | Перлитная сталь | |
| | | Аустенитная сталь | |

**для различных типов прокладок**

| Жидкие среды | | Воздух, пар, пароводяная смесь | | Газы с высокой проникающей способностью (водород, гелий и т. д.) | |
|---|---|---|---|---|---|
| $m$ | $q_0$, МПа | $m$ | $q_0$, МПа | $m$ | $q_0$, МПа |
| 1,2 | 5 | 2,2 | 9 | 3,0 | 13 |
| 1,4 | 10 | 2,5 | 18 | 3,1 | 26 |
| 1,6 | $\frac{80}{\sqrt{10\delta}}$ | 2,9 | $\frac{100}{\sqrt{10\delta}}$ | 4 | $\frac{130}{\sqrt{10\delta}}$ |
| 1,5 | 27 | 2,5 | 50 | 4 | 70 |
| 1,75 | 20 | 3,0 | 30 | 4,25 | 42 |
| 1,9 | 20 | 3,25 | 35 | 4,5 | 50 |
| 2,0 | 22 | 3,5 | 40 | 5 | 55 |
| 1,9 | 27 | 3,25 | 50 | 4,5 | 70 |
| 2,0 | 32 | 3,5 | 60 | 5 | 80 |
| 2,25 | 38 | 3,75 | 70 | 5,5 | 100 |
| 2,5 | $2,4R_{p0,2}$ | 4,5 | $3R_{p0,2}$ | 6 | $4R_{p0,2}$ |
| 3,0 | | 5,0 | | 7 | |
| 3,5 | | 6,0 | | 8 | |

| Тип прокладки | Конструкция прокладки | Материал | Эффективная ширина $b$, мм |
|---|---|---|---|
| Металлическая | Плоская   Клиновая   | Алюминий, его сплавы | $b_0$ при $b_0 \leqslant 10$ |
| | | Медь, ее сплавы; никель, его сплавы | $\sqrt{10b_0}$ при $b_0 > 10$ |
| | | Перлитная сталь | |
| | | Аустенитная сталь | |
| | Зубчатые с числом зубцов $z_n$   | Медь, ее сплавы; никель, его сплавы | $0{,}5\sqrt{z_n}$ |
| | | Перлитная сталь | |
| | | Аустенитная сталь | |

Примечание. Для клиновой прокладки $b_0 = \max\{b_2 \sin\alpha;\ h_1 \operatorname{tg}\alpha\}$ при наличии используются соответственно $h_1 - h'_1$, $b_1 - b'_1$ и $b_2 - b'_2$; при определении $q_0$ принимают

3.6.5. Гидростатические усилия от рабочего давления и давления гидроиспытания

$$F_p = 0{,}785 D_{pr}^2 p;$$

$$F_{ph} = 0{,}785 D_{pr}^2 p_h.$$

3.6.6. Усилие начальной затяжки шпилек должно быть выбрано из условий

$$F_{0w} \geqslant F_{ob},$$

$$F_{0w} \geqslant F_{pr.h} + (1 - \chi) F_{ph}.$$

3.6.7. Для сохранения герметичности должно быть выдержано условие

*Продолжение табл. П5.6*

| Жидкие среды | | Воздух, пар, пароводяная смесь | | Газы с высокой проникающей способностью (водород, гелий и т. д.) | |
|---|---|---|---|---|---|
| $m$ | $q_0$, МПа | $m$ | $q_0$, МПа | $m$ | $q_0$, МПа |
| 2,0 | $\left(0{,}8+0{,}26\frac{b_0}{\delta}\right)\times$ | 3,5 | $\left(1+0{,}32\frac{b_0}{\delta}\right)\times$ | 5 | $\left(1{,}3+0{,}42\frac{b_0}{\delta}\right)\times$ |
| 2,5 | $\times R_{p0,2}$ | 4,5 | $\times R_{p0,2}$ | 6 | $\times R_{p0,2}$ |
| 3,0 | | 5,0 | | 7 | |
| 3,5 | | 6,0 | | 8 | |
| 1,8 | | 3,3 | | 4,6 | |
| 2,25 | $2{,}4R_{p0,2}$ | 3,75 | $3R_{p0,2}$ | 5,5 | $4R_{p0,2}$ |
| 2,5 | | 4,25 | | 6 | |

проточек на прокладке или контактирующих поверхностях вместо значений $h_1$, $b_1$, $b_2$ $\delta=b_0$.

$$F_{0w}\geqslant F_{pr.p}+(1-\chi)F_p-F_T.$$

Если это условие не удовлетворяется, то следует выполнить конструктивные изменения соединения или изменить температурные режимы работы соединения.

При необходимости допускают увеличение усилия начальной затяжки в соответствии с приведенным условием.

### 3.7. РАСЧЕТ УСИЛИЙ НА ПРОКЛАДКЕ

3.7.1. Усилие на прокладке при затяжке

$$F_{pr}=F_{0w}.$$

3.7.2. Усилие на прокладке при гидроиспытании:

$F_{pr}=F_{0w}+\chi F_{ph}$ — для клиновой прокладки;

$F_{pr}=F_{0w}-(1-\chi)F_{ph}$ — для остальных видов прокладок.

3.7.3. Усилие на прокладке в рабочих условиях:

$F_{pr}=F_{0w}+\chi F_p+F_T$ — для клиновой прокладки;

$F_{pr}=F_{0w}-(1-\chi)F_p+F_T$ — для остальных видов прокладки.

3.7.4. Для клиновой прокладки кроме осевых усилий определяют радиальные силы:

радиальное усилие при начальной затяжке

$$Q_{pr}=F_{0w}/\operatorname{tg}\alpha;$$

радиальное усилие при гидроиспытании

$$Q_{pr}=[F_{0w}+\chi F_{ph}]/\operatorname{tg}\alpha;$$

радиальное усилие в рабочих условиях

$$Q_{pr}=(F_{0w}+\chi F_p+F_T)/\operatorname{tg}\alpha.$$

3.7.5. Плоские и клиновые прокладки проверяют по удельному давлению на контактирующие поверхности при затяжке, гидроиспытании и рабочих режимах.

Удельное давление на плоской прокладке

$$q=\frac{F_{pr}}{\pi D_{pr}b}.$$

Удельное давление на клиновой прокладке

$q=\dfrac{F_{pr}}{\pi D_{pr}(b_1-b'_1)}$ — для плоской контактной поверхности;

$q=\dfrac{F_{pr}}{\pi D_{pr}(b_2-b'_2)\sin\alpha}$ — для конусной контактной поверхности;

$q=\dfrac{F_{pr}}{\pi(D_{pr}+b_2\sin\alpha)(h_1-h'_1)\operatorname{tg}\alpha}$ — для цилиндрической контактной поверхности.

Необходимо выполнять следующие два условия:

1) $q\geqslant q_{\min}K$, где $q_{\min}$ — минимальное допустимое удельное давление на прокладку из условия герметичности разъемного соединения; $K$ — коэффициент, зависящий от проникающей способности уплотняемой среды;

2) $q\leqslant q_{\max}$, где $q_{\max}$ — максимальное допускаемое удельное давление на прокладку из условия ее работоспособности (табл. П5.7).

Рекомендуются следующие значения коэффициента $K$:

$K=1$ — для жидкой среды;

$K=1{,}8$ — для воздуха с высокой проникающей способностью (водород, гелий и т. п.).

Таблица П5.7. **Значения $q_{min}$ и $q_{max}$**

| Материал прокладки | $q_{min}$, МПа | $q_{max}$, МПа |
|---|---|---|
| Резина твердая | 3,5 | 20,0 |
| Фторопласт | 4,0 | 40,0 |
| Паронит | 10,0 | 110,0 |
| Алюминий и его сплавы | 50,0 | 140,0 |
| Медь и ее сплавы | 70,0 | 200,0 |
| Перлитная сталь | 80,0 | 350,0 |
| Аустенитная сталь | 100,0 | 600,0 |

Для клиновой прокладки удельное давление для плоской контактной поверхности проверяют только по условию 2.

В случае, если проверка по удельному давлению на контактирующие поверхности дает отрицательные результаты, следует выполнить конструктивные изменения соединения или изменить температурные режимы соединения. При необходимости допускают увеличение усилия начальной затяжки $F_{0w}$.

После выполнения хотя бы одного из этих мероприятий необходимо повторное проведение расчета.

### 3.8. РАСЧЕТ УСИЛИЙ В ШПИЛЬКАХ

3.8.1. Усилие на шпильках при затяжке

$$F_w = F_{0w}.$$

3.8.2. Усилие на шпильках при гидроиспытании

$$F_w = F_{0w} + \chi F_{ph}.$$

3.8.3. Усилие на шпильках в рабочих условиях

$$F_w = F_{0w} + \chi F_p + F_T.$$

### 3.9. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ШПИЛЬКАХ

3.9.1. Расчет стержня шпильки

3.9.1.1. Крутящий момент, действующий на шпильку при затяжке гаек ключом,

$$M_k = \zeta F_{0w} d_0 / z,$$

где $\zeta$ выбирается по табл. П5.8.

Таблица П5.8. **Значения коэффициентов $\zeta$ и $\zeta_1$**

| Наличие смазки | $\zeta$ | $\zeta_1$ |
|---|---|---|
| Есть | 0,13 | 0,26 |
| Отсутствует | 0,18 | 0,37 |

Момент на ключе при затяжке гаек

$$M_{кл} = \zeta_1 F_{0w} d_0 / z,$$

где $\zeta_1$ выбирается по табл. П5.8.

При затяжке шпилек с пред-

варительным разогревом или предварительной вытяжкой $M_k=0$.

3.9.1.2. Изгибающие моменты в шпильке вычисляют по формулам

$$M_1=E_wJ\left[\frac{6K_3}{l^2}(W_2-W_1)+\frac{4K_1}{l}\vartheta_1+\frac{2K_2}{l}\vartheta_2\right];$$

$$M_2=E_wJ\left[\frac{6K_3}{l^2}(W_2-W_1)+\frac{2K_2}{l}\vartheta_1+\frac{4K_1}{l}\vartheta_2\right],$$

где $J=0{,}049d_m^4$;

$$K_1=K_2=K_3=1 \text{ для } \gamma=l\sqrt{\frac{F_w}{E_wJz}}<1;$$

$$K_1=1+\frac{\gamma^2}{40};\ K_2=1-\frac{\gamma^2}{16\gamma+35};\ K_3=1+\frac{\gamma^2}{70} \text{ для } 1\leqslant\gamma\leqslant 6;$$

$$K_1=\frac{\gamma(\gamma-1)}{4(\gamma-2)};\ K_2=\frac{\gamma}{2(\gamma-2)};\ K_3=\frac{\gamma^2}{6(\gamma-2)} \text{ для } \gamma>6.$$

$W_1$, $W_2$, $\vartheta_1$, $\vartheta_2$ определяются из условия совместности деформаций соединения.

Принятые в формулах положительные направления перемещений и углов поворота указаны на рис. П5.17.

3.9.1.3. Напряжение растяжения

$$\sigma_{mw}=\frac{F_w}{A_wz},$$

где $A_w=0{,}785d_1^2$.

3.9.1.4. Напряжение кручения

$$\tau_{sw}=\frac{M_k}{W_k},$$

где $W_k=0{,}196d_1^3$.

3.9.1.5. Напряжение изгиба

$$\sigma_{bw}=\frac{M}{W},$$

где $W=0{,}1d_1^3$.

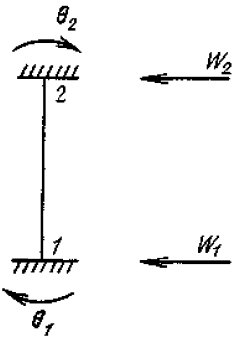



Рис. П5.17. Положительные направления перемещений и узлов поворота шпильки

3.9.2. Расчет резьбы шпильки

3.9.2.1. Напряжение среза резьбы

$$\tau_p = \frac{F_w}{\pi d_1 h z K_1 K_m},$$

где $K_1$ — коэффициент полноты резьбы; $K_1 = 0{,}87$ — для метрической резьбы (гайки); $K_1 = 0{,}75$ — для метрической резьбы (болты, шпильки); $K_1 = 0{,}4$ — для прямоугольной резьбы; $K_1 = 0{,}65$ для трапецеидальной резьбы; $K_m$ — коэффициент, учитывающий изменение деформации витков по высоте гайки (табл. П5.9).

Таблица П5.9. **Значения коэффициента $K_m$**

| $R_{mб}/R_{mг}$ | Шаг резьбы | $K_m$ |
|---|---|---|
| Свыше 1,3 | Крупный и первый мелкий<br>Второй и более мелкий | 0,7—0,75<br>0,65—0,7 |
| Менее 1,3 | Для всех шагов | 0,55—0,6 |

Примечание. $R_{mб}$, $R_{mг}$ — пределы прочности болта и гайки.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 6*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\sigma$ — напряжение, МПа (кгс/мм$^2$)

$R_{mt}^T$ — условный предел длительной прочности за время $t$ при температуре $T$, МПа (кгс/мм$^2$)

$R_{ctA_s}^T$ — условный предел ползучести при температуре $T$ для времени $T_{A_s}$ достижения заданной деформации $A_s$, МПа (кгс/мм$^2$)

$T$ — температура, К (°С)

$t_T$ — текущее время испытания, ч

$t_к$ — время до разрушения, ч

$t^T$, $t^{T_1}$ — текущее время испытания при температурах $T$, $T_1$, ч

$t$ — время достижения заданного остаточного удлинения $A_з$, ч

$t_з^T$ — заданный ресурс при температуре $T_j$, ч

$e$ — деформация, %

$\dot{e}$ — скорость ползучести, %/ч

$A$ — относительное удлинение после разрыва, %

$A_t^T$ — условный предел остаточного удлинения при разрыве при температуре $T_j$, %

$A_з$ — заданное остаточное удлинение, %

$Z$ — относительное сужение площади поперечного сечения образца при разрыве, %

$Z_t^T$ — условный предел длительного статического сужения при температуре $T$ за время $t$, %

$R_{mi,P}^{T_1}$, $A_{t_з,P}^{T}$, $Z_{t_з,P}^{T}$ — характеристики жаропрочности при температуре $T$, для заданного уровня вероятности разрушения $P$ и ресурса $t_з$, МПа (кгс/мм$^2$), %

$\gamma_{д.п}$ — коэффициент экстраполяции длительной прочности

$\gamma_п$ — коэффициент экстраполяции ползучести

$S_{R_{mi}^T}$, $S_{R_\alpha^T}$, $S_{A_t^T}$ — среднеквадратические отклонения характеристик жаропрочности;

$n^T$ — число опытов при температуре $T$

$P$ — вероятность разрушения

$M$ — количество партий

## 2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Настоящее приложение к нормам расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок содержит методы получения характеристик жаропрочности конструкционных материалов. Рассматривается область температур 573—923 К (300—650° С), при которых в металле проявляются ползучесть и длительная прочность.

2.2. Допускается для определения характеристик жаропрочности с вероятностью $P=0{,}5$ и $P=0{,}01$ (условного предела прочности, условного предела ползучести, условных пределов относительных удлинения и сужения) использование параметрических методов в соответствии с ОСТ 108.901.102—78 (разд. 5).

2.3. Количество образцов при испытаниях одной партии распределяют равномерно по напряжениям, соответствующим долговечности от $10^2$ до $10^4$ ч и более, с таким расчетом, чтобы на каждый порядок по времени число уровней напряжений было не менее двух.

Минимальное число испытанных образцов должно составлять 12.

2.4. При каждом режиме испытывают не менее двух образцов. Если времена до разрушения образцов, испытанных на одном и том же режиме, различаются между собой более чем в 2 раза, то проводят дополнительные испытания на двух образцах.

При обработке результатов испытаний учитывают все результаты, полученные при основных и дополнительных испытаниях.

2.5. Испытания для получения условного предела ползучести проводят с замером деформации по ГОСТ 3248—81.

2.6. Испытания образцов проводят при температуре $T_1$, для которой определяют характеристики жаропрочности, и более высокой температуре

$$T_2 = T_1 + 50 \text{ К}.$$

2.7. Предлагаемый метод определения характеристик жаропрочности материалов допускает экстраполяцию по параметру $t$ в пределах одного порядка, но до напряжений, не меньших минимальных, полученных при испытаниях на длительную прочность при температуре $T_2$.

2.8. Для получения гарантированных характеристик жаропрочности стали или сплава считаются правомерными результаты испытаний, полученные для разных партий, представляющих марку стали или сплава данной категории прочности. Число испытанных партий металла различных плавок должно быть не менее шести.

В число испытываемых включают партии и металл изделий после окончательных технологических операций с содержанием углерода и легирующих элементов и значениями кратковременной прочности и пластичности в пределах, оговоренных в технических условиях (ТУ).

2.9. При отсутствии прямых испытаний по определению характеристик жаропрочности стали или сплава категории прочности ниже приведенной в табл. П1.4 Норм, их пределы длительной прочности определяют по значениям пределов длительной прочности марки стали или сплава категории прочности, указанной в табл. П1.4 Норм, и их временного сопротивления и пределов текучести. Искомое значение принимают минимальным из двух (величин), определяемых по формулам

$$\frac{(R^T_{mt})_2}{(R^T_{mt})_1} = \left[\frac{(R^T_{p0,2})_2}{(R^T_{p0,2})_1}\right]^{1/2};$$

$$\frac{(R^T_{mt})_2}{(R^T_{mt})_1} = \frac{(R^T_m)_2}{(R^T_m)_1},$$

где индекс 1 — категория прочности, приведенная в табл. П1.4 Норм (категория прочности 1); индекс 2 — категория прочности, для которой рассчитывают характеристики жаропрочности (категория прочности 2); $(R^T_{mt})_1$, $(R^T_{mt})_2$, $(R^T_{p0,2})_1$, $(R^T_{p0,2})_2$, $(R^T_m)_1$, $(R^T_m)_2$ — соответственно пределы длительной прочности, текучести и временное сопротивление металла категорий прочности 1 и 2. Значения требуемых характеристик выбирают по табл. П1.1 и П1.4 Норм.

Таким же образом значение длительной пластичности (относительных удлинения $A^T_t$ и сужения $Z^T_t$) металла категории прочности 2 допускается определять по известным значениям пределов относительного удлинения (сужения) металла при категории прочности 1, временного сопротивления и предела текучести металла категорий прочности 1 и 2. Искомое значение принимают минимальным из двух характеристик, определяемых по формулам:

для $Z^T_t$

$$(Z^T_t)_1=(Z^T_t)_2\left[\frac{(R^T_m)_2}{(R^T_m)_1}\right]^5;\quad (Z^T_t)_1=(Z^T_t)_2\left[\frac{(R^T_{p0,2})_2}{(R^T_{p0,2})_1}\right]^{3,6};$$

для $A^T_t$

$$(A^T_t)_1=(A^T_t)_2\left[\frac{(R^T_m)_2}{(R^T_m)_1}\right]^4;\quad (A^T_t)_1=(A^T_t)_2\left[\frac{(R^T_{p0,2})_2}{(R^T_{p0,2})_1}\right]^3,$$

где $(Z^T_t)_1$, $(Z^T_t)_2$, $(A^T_t)_1$, $(A^T_t)_2$ — соответственно пределы длительных относительных сужения и удлинения металла категорий прочности 1 и 2.

Значения $(A^T_t)_1$ и $(Z^T_t)_1$ берут по табл. П6.3. Для металла категории прочности выше приведенной в табл. П1.4 Норм значения $R^T_{mt}$, $Z^T_t$ и $A^T_t$ выбирают в соответствии с указанными в табл. П1.1 Норм и табл. П6.3.

2.10. В настоящем приложении приведены:

таблицы средних значений пределов длительной прочности за время от 10 до $2\cdot10^5$ ч (табл. П6.1, П6.2);

кривые длительной прочности (по минимальным значениям рис. П6.1 — П6.17);

таблицы средних значений пределов длительной пластичности на базе $2\cdot10^5$ ч (табл. П6.3, П6.4);

изохронные кривые деформирования (ползучести), построенные при заданной температуре по параметру времени в координатах $\sigma$—$e$ по средним значениям (рис. П6.18 — П6.29);

методы экстраполяции на длительные времена характеристик длительной прочности, пластичности и ползучести.

Характеристики жаропрочности используют:

Таблица П6.1. **Средние значения условных пределов длительной прочности $R^T_m$, МПа (кгс/мм²)**

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_m$, МПа (кгс/мм²) | Температура, К (°С) | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| 15ХМ | ⩾235 (24) | ⩾441 (45) | 773 (500) | 412 (42) | 402 (41) | 372 (38) | 348 (35,5) | 314 (32) | 260 (26,5) | 217 (22,1) | 183 (18,7) | 142 (14,5) | 120 (12,2) |
| 12МХ | ⩾225 (23) | ⩾411 (42) | 773 (500) | 368 (37) | 368 (37) | 353 (36) | 328 (33,5) | 299 (30,5) | 274 (28) | 207 (21,1) | 174 (17,8) | 135 (13,8) | 114 (11,6) |
| 10Х2М (48ТН-1) | ⩾245 (25) | ⩾392 (40) | 723 (450) | 372 (38) | 353 (36) | 333 (34) | 314 (32) | 294 (30) | 274 (28) | 255 (26) | 225 (23) | 196 (20) | 186 (19) |
| | | | 773 (500) | 353 (36) | 313 (32) | 284 (29) | 255 (26) | 216 (22) | 186 (19) | 157 (16) | 137 (14) | 118 (12) | 108 (11) |
| | | | 783 (510) | 319 (32,5) | 289 (29,5) | 261 (26,6) | 234 (23,9) | 201 (20,5) | 172 (17,5) | 145 (14,8) | 126 (12,9) | 108 (11) | 99 (10,1) |
| 12Х2М | ⩾343 (35) | ⩾539 (55) | 773 (500) | 451 (46) | 431 (44) | 412 (42) | 353 (36) | 294 (30) | 265 (27) | 216 (22) | 177 (18) | 147 (15) | 132 (13,5) |
| | ⩾255 (25) | ⩾451 (46) | 773 (500) | 392 (40) | 372 (38) | 343 (35) | 294 (30) | 255 (26) | 216 (22) | 177 (18) | 147 (15) | 118 (12) | 105 (10,7) |
| 10Х2М1ФБ (48ТН-2) | ⩾196 (20) | ⩾343 (35) | 673 (400) | 333 (34) | 319 (33) | 304 (31) | 297 (30) | 284 (29) | 268 (27) | 235 (24) | 212 (22) | 186 (19) | 167 (17) |
| | | | 723 (450) | 333 (34) | 314 (32) | 299 (30,5) | 294 (30) | 269 (27,5) | 250 (25,5) | 225 (23) | 201 (20,5) | 176 (18) | 167 (17) |
| | | | 773 (500) | 250 (25,5) | 230 (23,5) | 201 (20,5) | 181 (18,5) | 162 (16,5) | 147 (15) | 132 (13,5) | 122 (12,5) | 108 (11) | 98 (10) |
| | | | 823 (550) | 216 (22) | 196 (20) | 167 (17) | 147 (15) | 127 (13) | 113 (11,5) | 98 (10) | 83 (8,5) | 78 (8) | 70 (7,2) |
| 12Х1МФ | ⩾274 (28) | ⩾441 (45) | 723 (450) | 353 (36) | 343 (35) | 323 (33) | 303 (31) | 289 (29,5) | 268 (27,5) | 245 (25) | 227 (23,5) | 196 (20) | 186 (19) |
| | | | 773 (500) | 353 (36) | 343 (35) | 323 (33) | 304 (31) | 279 (28,5) | 260 (26,5) | 216 (22) | 186 (19) | 147 (15) | 137 (14) |
| 12Х18Н10Т 12Х18Н12Т | ⩾216 (22) | ⩾529 (54) | 673 (400) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) |
| | | | 723 (450) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 372 (38) | 333 (34) | 314 (32) |

*Продолжение табл. П6.1*

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_{m}$, МПа (кгс/мм²) | Температура, K (°C) | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| | | | 773 | 372 | 352 | 333 | 323 | 314 | 284 | 255 | 225 | 196 | 186 |
| | | | (500) | (38) | (36) | (34) | (33) | (32) | (29) | (26) | (23) | (20) | (19) |
| | | | 823 | 353 | 333 | 314 | 294 | 265 | 235 | 201 | 171 | 149 | 137 |
| | | | (550) | (36) | (34) | (32) | (30) | (27) | (24) | (20,5) | (17,5) | (15,2) | (14) |
| | | | 873 | 314 | 284 | 255 | 240 | 216 | 186 | 157 | 127 | 108 | 97 |
| | | | (600) | (32) | (29) | (26) | (24,5) | (22) | (19) | (16) | (13) | (11) | (9,9) |
| 08Х16Н11М3 | ⩾196 | ⩾510 | 673 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 |
| | (20) | (52) | (400) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) | (40) |
| | | | 723 | 372 | 372 | 372 | 372 | 372 | 353 | 343 | 314 | 294 | 284 |
| | | | (450) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (36) | (35) | (32) | (30) | (29) |
| | | | 773 | 372 | 372 | 372 | 343 | 323 | 304 | 284 | 245 | 220 | 196 |
| | | | (500) | (38) | (38) | (38) | (35) | (33) | (31) | (29) | (25) | (22,5) | (20) |
| | | | 823 | 332 | 304 | 274 | 260 | 245 | 230 | 216 | 191 | 167 | 157 |
| | | | (550) | (34) | (31) | (28) | (26,5) | (25) | (23,5) | (22) | (19,5) | (17) | (16) |
| | | | 873 | 265 | 240 | 216 | 196 | 167 | 157 | 137 | 110 | 108 | 96 |
| | | | (600) | (27) | (24,5) | (22) | (20) | (17) | (16) | (14) | (12) | (11) | (10) |
| 15Х1М1Ф | ⩾314 | ⩾490 | 773 | 363 | 343 | 333 | 314 | 288 | 270 | 240 | 225 | 196 | 184 |
| | (32) | (50) | (500) | (37) | (35) | (34) | (32) | (29,4) | (27,5) | (24,5) | (23) | (20,1) | (18,8) |
| 12Х18Н9 | ⩾196 | ⩾490 | 673 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 |
| | (20) | (50) | (400) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) |
| | | | 723 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 373 | 323 | 303 | 274 |
| | | | (450) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (38) | (33) | (31) | (28) |
| | | | 773 | 373 | 353 | 343 | 323 | 294 | 265 | 245 | 216 | 196 | 186 |
| | | | (500) | (38) | (36) | (35) | (33) | (30) | (27) | (25) | (22) | (20) | (19) |
| | | | 823 | 333 | 323 | 298 | 284 | 245 | 206 | 176 | 157 | 137 | 127 |
| | | | (550) | (34) | (33) | (30,5) | (29) | (25) | (21) | (18) | (16) | (14) | (13) |
| | | | 873 | 274 | 265 | 240 | 201 | 172 | 157 | 123 | 108 | 88 | 78 |
| | | | (600) | (28) | (27) | (24,5) | (20,5) | (17,5) | (16) | (12,5) | (11) | (9) | (8) |
| 10Х17Н13М2Т | ⩾196 | ⩾510 | 773 | 304 | 284 | 265 | 250 | 235 | 216 | 201 | 176 | 157 | 147 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (20) | (52) | (500) | (31) | (29) | (27) | (25,5) | (24) | (22) | (20,5) | (18) | (16) | (15) |
| | | | 823 | 255 | 235 | 216 | 196 | 176 | 162 | 147 | 129 | 118 | 108 |
| | | | (550) | (26) | (24) | (22) | (20) | (18) | (16,5) | (15) | (13,2) | (12) | (11) |
| | | | 873 | 221 | 203 | 186 | 167 | 152 | 132 | 113 | 98 | 83 | 77 |
| | | | (600) | (22,5) | (20,7) | (19) | (17) | (15,5) | (13,5) | (11,5) | (10) | (8,5) | (7,9) |
| ХН35ВТ | ⩾392 | ⩾736 | 673 | 645 | 645 | 645 | 645 | 645 | 645 | 645 | 645 | 627 | 588 |
| | (40) | (75) | (400) | (66) | (66) | (66) | (66) | (66) | (66) | (66) | (66) | (64) | (60) |
| | | | 723 | 637 | 637 | 637 | 637 | 637 | 637 | 625 | 568 | 549 | 530 |
| | | | (450) | (65) | (65) | (65) | (65) | (65) | (65) | (62,5) | (58) | (56) | (54) |
| | | | 773 | 637 | 588 | 549 | 529 | 500 | 480 | 451 | 412 | 343 | 323 |
| | | | (500) | (65) | (60) | (56) | (54) | (51) | (49) | (46) | (42) | (35) | (33) |
| | | | 823 | 539 | 529 | 490 | 470 | 441 | 417 | 372 | 333 | 304 | 284 |
| | | | (550) | (55) | (54) | (50) | (48) | (45) | (42) | (38) | (34) | (31) | (29) |
| | | | 873 | 431 | 412 | 392 | 363 | 343 | 314 | 294 | 250 | 216 | 196 |
| | | | (600) | (44) | (42) | (40) | (37) | (35) | (32) | (30) | (25,5) | (22) | (20) |
| 1Х16Н36МБТЮР | ⩾392 | ⩾785 | 773 | 884 | 850 | 824 | 808 | 794 | 768 | 612 | 579 | 519 | 500 |
| | (40) | (80) | (500) | (90,2) | (86,8) | (84) | (82,4) | (81) | (78,3) | (62,5) | (59) | (53) | (51) |
| 12Х18Н12М3ТЛ | ⩾216 | ⩾491 | 773 | 284 | 280 | 274 | 270 | 267 | 235 | 216 | 186 | 176 | 162 |
| | (22) | (50) | (500) | (29) | (28,5) | (28) | (27,5) | (27) | (24) | (22) | (19) | (18) | (16,5) |
| 09Х16Н15М3Б | ⩾245 | ⩾540 | 823 | 472 | 449 | 431 | 412 | 372 | — | — | — | — | — |
| | (25) | (55) | (550) | (48,1) | (45,8) | (43,9) | (42,0) | (38) | | | | | |
| | | | 837 | 432 | 392 | 355 | 328 | 294 | — | — | — | — | — |
| | | | (600) | (44) | (40) | (36,2) | (33,2) | (30) | | | | | |
| 25Х1МФ | ⩾589 | ⩾736 | 773 | 587 | 549 | 472 | 392 | 325 | 281 | 255 | 212 | 167 | — |
| | (60) | (75) | (500) | (59,8) | (56,1) | (48,1) | (40) | (33,2) | (28,7) | (26) | (21,6) | (17) | |
| Zr—2,5% Nb | ⩾294 | ⩾392 | 573 | 314 | 301 | 289 | 276 | 265 | 255 | 245 | 225 | 206 | 196 |
| | (30) | (40) | (300) | (32) | (30,7) | (29,5) | (28,2) | (27) | (26) | (25) | (23) | (21) | (20) |
| | | | 598 | 304 | 294 | 284 | 265 | 245 | 228 | 212 | 196 | 181 | 172 |
| | | | (325) | (31) | (30) | (29) | (27) | (25) | (23,3) | (21,6) | (20) | (18,5) | (17,5) |
| | | | 623 | 284 | 267 | 250 | 232 | 216 | 198 | 181 | 164 | 147 | 137 |
| | | | (350) | (29) | (27,2) | (25,5) | (23,7) | (22,0) | (20,2) | (18,5) | (16,7) | (15) | (14) |
| 20ХМЛ | ⩾245 | ⩾441 | 773 | 412 | 402 | 372 | 348 | 314 | 289 | 217 | 183 | 142 | 120 |
| | (25) | (45) | (500) | (42) | (41) | (38) | (35,5) | (32) | (29,5) | (22,1) | (18,7) | (14,5) | (12,2) |
| 20ХМФЛ | ⩾294 | ⩾490 | 773 | 441 | 412 | 382 | 348 | 304 | 265 | 225 | 196 | 161 | 144 |
| | (30) | (50) | (500) | (45) | (42) | (39) | (35,5) | (31) | (27) | (23) | (20) | (16,4) | (14,7) |
| 15Х1М1ФЛ | ⩾314 | ⩾490 | 773 | 363 | 343 | 333 | 314 | 288 | 270 | 240 | 225 | 196 | 184 |
| | (32) | (50) | (500) | (37) | (35) | (34) | (32) | (29,4) | (27,5) | (24,5) | (23) | (20) | (18,8) |
| 04Х18Н10 | ⩾157 | ⩾441 | 773 | 304 | 284 | 265 | 250 | 235 | 216 | 201 | 176 | 157 | 147 |

*Продолжение табл. П6.1*

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0.2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_{m}$, МПа (кгс/мм²) | Температура, К (°С) | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| 03Х18Н11 | (16) | (45) | (500) | (31) | (29) | (27) | (25,5) | (24) | (22) | (20,5) | (18) | (16) | (15) |
| | ⩾196 | ⩾510 | 823 | 255 | 235 | 216 | 196 | 176 | 162 | 147 | 129 | 118 | 108 |
| | (20) | (50) | (550) | (26) | (24) | (22) | (20) | (18) | (16,5) | (15) | (13,2) | (12) | (11) |
| ОХ20Н46Б | ⩾196 | ⩾520 | 823 | 353 | 333 | 314 | 294 | 265 | 235 | 201 | 171 | 149 | 137 |
| | (20) | (53) | (550) | (36) | (34) | (32) | (30) | (27) | (24) | (20,5) | (17,5) | (15,2) | (14) |
| 09Г2С | ⩾245 | ⩾432 | 673 | 416 | 392 | 363 | 347 | 317 | 287 | 254 | 223 | 191 | 173 |
| | (25) | (44) | (400) | (42,4) | (40) | (37) | (35,4) | (32,3) | (29,3) | (26) | (22,8) | (19,5) | (17,7) |
| | | | 723 | 319 | 290 | 259 | 229 | 198 | 171 | 143 | 120 | 97 | 85 |
| | | | (450) | (32,6) | (29,6) | (26,4) | (23,4) | (20,2) | (17,4) | (14,6) | (12,2) | (9,9) | (8,7) |
| | | | 773 | 219 | 192 | 164 | 139 | 116 | 96 | 77 | 62 | 48 | 48 |
| | | | (500) | (22,3) | (19,6) | (16,7) | (14,2) | (11,8) | (9,8) | (7,8) | (6,3) | (4,9) | (4,9) |
| 10Х12В2МФ | ⩾392 | ⩾588 | 773 | 350 | 322 | 300 | 272 | 250 | 230 | 215 | 195 | 175 | 167 |
| | (40) | (60) | (500) | (35,7) | (32,9) | (30,6) | (27,8) | (25,5) | (23,5) | (21,9) | (19,9) | (17,9) | (17) |
| | | | 823 | 275 | 251 | 230 | 210 | 190 | 172 | 157 | 142 | 129 | 120 |
| | | | (550) | (28,1) | (25,6) | (23,5) | (21,4) | (19,4) | (17,6) | (16) | (14,5) | (13,2) | (12,2) |
| 09Х18Н9 | ⩾196 | ⩾490 | 773 | 361 | 342 | 333 | 314 | 285 | 256 | 238 | 209 | 190 | 180 |
| | (20) | (50) | (500) | (36,8) | (34,9) | (34) | (32) | (29,1) | (26,1) | (24,3) | (21,3) | (19,4) | (18,4) |
| | | | 823 | 323 | 313 | 290 | 275 | 237 | 200 | 171 | 152 | 133 | 123 |
| | | | (550) | (33) | (31,9) | (29,6) | (28,1) | (24,2) | (20,4) | (17,4) | (15,5) | (13,6) | (12,6) |
| | | | 873 | 266 | 257 | 232 | 195 | 166 | 152 | 119 | 100 | 85 | 76 |
| | | | (600) | (27,1) | (26,2) | (23,7) | (19,9) | (16,9) | (15,5) | (12,1) | (10,2) | (8,67) | (7,76) |
| 16ГНМА | ⩾323 | ⩾490 | 673 | 490 | 490 | 490 | 478 | 470 | 442 | 420 | 380 | 350 | 320 |
| | (33) | (50) | (400) | (50) | (50) | (50) | (48,7) | (48) | (45,1) | (42,9) | (38,8) | (35,7) | (32,7) |
| | | | 723 | 437 | 433 | 428 | 419 | 406 | 379 | 339 | 295 | 242 | 212 |
| | | | (450) | (44,6) | (44,2) | (43,7) | (42,7) | (41,1) | (38,7) | (34,6) | (30,1) | (24,7) | (21,6) |
| | | | 773 | 401 | 383 | 353 | 316 | 273 | 229 | 181 | 139 | 100 | 80 |
| | | | (500) | (40,9) | (39,1) | (36) | (32,2) | (27,9) | (23,4) | (18,5) | (14,2) | (10,2) | (8,16) |
| 08Х18Н10Т | ⩾196 | ⩾490 | 773 | 374 | 353 | 333 | 323 | 309 | 284 | 255 | 243 | 201 | 186 |
| | (20) | (50) | (500) | (38) | (36) | (34) | (33) | (32) | (29) | (26) | (25) | (21) | (19) |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 823 | 324 | 304 | 294 | 266 | 245 | 208 | 178 | 144 | 120 | 108 |
| | | (550) | (33) | (31) | (30) | (27) | (25) | (21) | (18) | (15) | (12) | (11) |
| | | 873 | 276 | 255 | 226 | 201 | 167 | 142 | 117 | 98 | 93 | 83 |
| | | (600) | (28) | (26) | (23) | (21) | (17) | (14) | (12) | (10) | (9) | (8) |

Таблица П6.2. **Средние значения условных пределов длительной прочности сварочных материалов $R^T_{ш}$, МПа (кгс/мм²)**

| Марка стали, сплава | Температура, К (°С) | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| Электрод для ручной дуговой сварки 48А-1 | 673 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 |
| | (400) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) |
| | 723 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | 309 | 294 | 274 |
| | (450) | (33) | (33) | (33) | (33) | (33) | (33) | (33) | (31,5) | (30) | (28) |
| | 773 | 294 | 291 | 289 | 286 | 284 | 274 | 265 | 232 | 200 | 171 |
| | (500) | (30) | (29,7) | (29,5) | (29,2) | (29) | (28) | (27) | (23,7) | (20,5) | (17,5) |
| | 803 | 274 | 271 | 270 | 257 | 245 | 232 | 220 | 198 | 176 | 157 |
| | (530) | (28) | (27,7) | (27,5) | (26,2) | (25) | (23,7) | (22,5) | (20,2) | (18) | (16) |
| | 873 | 274 | 250 | 225 | 198 | 171 | 152 | 132 | 120 | 108 | 98 |
| | (600) | (28) | (25,5) | (23) | (20,2) | (17,5) | (15,5) | (13,5) | (12,2) | (11) | (10) |
| | 923 | 216 | 188 | 161 | 144 | 127 | 110 | 93 | 80 | 69 | 59 |
| | (650) | (22) | (19,2) | (16,5) | (14,7) | (13) | (11,2) | (9,5) | (8,2) | (7) | (6) |
| 48А-2 | 673 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 | 343 |
| | (400) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) | (35) |
| | 723 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | 323 | 309 | 294 | 274 |
| | (450) | (33) | (33) | (33) | (33) | (33) | (33) | (33) | (31,5) | (30) | (28) |
| | 773 | 294 | 291 | 289 | 286 | 284 | 274 | 265 | 232 | 200 | 180 |
| | (500) | (30) | (29,7) | (29,5) | (29,2) | (29) | (28) | (27) | (23,7) | (20,5) | (18) |
| | 803 | 274 | 270 | 265 | 255 | 245 | 235 | 225 | 200 | 176 | 157 |
| | (530) | (28) | (27,5) | (27) | (26) | (25) | (24) | (23) | (20,5) | (18) | (16) |
| | 873 | 225 | 215 | 206 | 183 | 162 | 139 | 118 | 103 | 88 | 78 |
| | (600) | (23) | (22) | (21) | (18,7) | (16,5) | (14,2) | (12) | (10,5) | (9) | (8) |

Таблица П6.3. **Средние значения условных пределов длительной пластичности материалов**

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_{m}$, МПа (кгс/мм²) | Температура, К (°С) | Пластичность, % | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| 15ХМ | ⩾235 | ⩾441 | 723 | $A_t^T$ | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 29 | 26 | 22 | 20 |
| | (24) | (45) | (450) | $Z_t^T$ | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 65 | 51 | 40 | 34 |
| 12МХ | ⩾235 | ⩾411 | 773 | $A_t^T$ | 34 | 34 | 34 | 31 | 24 | 18 | 16 | 18 | 26 | 36 |
| | (24) | (42) | (500) | $Z_t^T$ | 70 | 70 | 70 | 59 | 42 | 33 | 28 | 30 | 35 | 44 |
| 12Х2М | ⩾255 | ⩾451 | 723 | $A_t^T$ | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| | (26) | (46) | (450) | $Z_t^T$ | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| | | | 773 | $A_t^T$ | 22 | 23 | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 19 | 16 | 14 |
| | | | (500) | $Z_t^T$ | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 69 | 62 | 58 | 50 | 45 |
| 12Х1МФ | ⩾274 | ⩾441 | 773 | $A_t^T$ | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 29 | 25 | 20 | 14 | 11 |
| | (28) | (45) | (500) | $Z_t^T$ | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 72 | 60 | 50 | 40 | 33 |
| 15Х1М1Ф | ⩾314 | ⩾490 | 773 | $A_t^T$ | 20 | 21 | 23 | 25 | 26 | 25 | 20 | 15,5 | 11 | 8,5 |
| | (32) | (50) | (500) | $Z_t^T$ | 82 | 85 | 85 | 85 | 80 | 73 | 60 | 49 | 36 | 29 |
| 12Х18Н10Т, | ⩾216 | ⩾529 | 823 | $A_t^T$ | 22 | 17 | 14 | 12 | 10,5 | 9 | 8 | 7,5 | 7 | 6,5 |
| 12Х18Н12Т, | (22) | (54) | (550) | $Z_t^T$ | 34 | 29 | 24 | 21 | 18 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| 08Х18Н10Т | | | 873 | $A_t^T$ | 16 | 13 | 11 | 9,5 | 8,5 | 7,5 | 6,5 | 6,5 | 7 | 6,5 |
| | | | (600) | $Z_t^T$ | 40 | 32 | 26 | 21 | 17 | 17 | 17 | 18 | 20 | 21 |
| 20ХМЛ | ⩾245 | ⩾441 | 773 | $A_t^T$ | 30 | 27 | 20 | 11 | 7 | 6 | 6,5 | 9 | 18 | 24 |
| | (25) | (45) | (500) | $Z_t^T$ | 45 | 45 | 43 | 32 | 20 | 13 | 10 | 13 | 25 | 32 |
| 20ХМФЛ | ⩾294 | ⩾490 | 773 | $A_t^T$ | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 23 | 17 | 12 | 8 | 6 |
| | (30) | (50) | (500) | $Z_t^T$ | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 52 | 40 | 32 | 24 | 20 |
| 15Х1М1ФЛ | ⩾314 | ⩾490 | 773 | $A_t^T$ | 16 | 17 | 19 | 20 | 20 | 20 | 16 | 12 | 9 | 7 |
| | (32) | (50) | (500) | $Z_t^T$ | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 55 | 40 | 30 | 22 | 18 |
| 05Х12Н2М-ВИ | ⩾372 | ⩾539 | 723 | $A_t^T$ | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (38) | (55) | (450) | $Z_t^T$ | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| | | | 773 | $A_t^T$ | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | | | (500) | $Z_t^T$ | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | | | 823 | $A_t^T$ | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| | | | (550) | $Z_t$ | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| 12Х18Н9 | ⩾196 | ⩾490 | 773 | $A_t^T$ | 28 | 25 | 21 | 16 | 15 | 14 | 12 | 11 | 9 | 8 |
| | (20) | (50) | (500) | $Z_t^T$ | 44 | 38 | 33 | 29 | 25 | 22 | 19 | 17 | 14 | 13 |
| | | | 823 | $A_t^T$ | 29 | 24 | 20 | 17 | 14 | 12 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | | (550) | $Z_t^T$ | 46 | 40 | 34 | 30 | 26 | 23 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| | | | 873 | $A_t^T$ | 22 | 18 | 17 | 22 | 27 | 24 | 15 | 10 | 7 | 5 |
| | | | (600) | $Z_t$ | 40 | 33 | 31 | 34 | 42 | 32 | 23 | 16 | 11 | 9 |
| ХН35ВТ | ⩾392 | ⩾736 | 773 | $A_t^T$ | 13 | 10 | 9 | 7 | 5 | 4,5 | 4 | 3,5 | 3 | 3 |
| | (40) | (75) | (500) | $Z_t^T$ | 18 | 15 | 13 | 10 | 7,5 | 7 | 6 | 5 | 4,5 | 4,5 |
| | | | 823 | $A_t^T$ | 13 | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | | | (550) | $Z_t^T$ | 18 | 15 | 12 | 9 | 7,5 | 6 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| | | | 873 | $A_t^T$ | 15 | 11 | 9 | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | | | (600) | $Z_t$ | 22 | 16 | 13 | 9 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 10Х2М1ФБ | ⩾196 | ⩾343 | 673 | $A_t^T$ | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | (20) | (35) | (400) | $Z_t^T$ | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| | | | 723 | $A_t^T$ | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | | | (450) | $Z_t^T$ | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| | | | 773 | $A_t^T$ | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| | | | (500) | $Z_t^T$ | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| | | | 823 | $A_t^T$ | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| | | | (550) | $Z_t$ | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| 08Х16Н11М3 | ⩾196 | ⩾510 | 823 | $A_t^T$ | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| | (20) | (52) | (550) | $Z_t^T$ | 35 | 35 | 35 | 35 | 34 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| | | | 873 | $A_t^T$ | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 28 | 25 | 21 | 19 |
| | | | (600) | $Z_t^T$ | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 35 | 30 | 24 | 22 |
| Сплав циркония | ⩾294 | ⩾392 | 573 | $A_t$ | 20 | 21 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| Zr — 2,5% Nb | (30) | (40) | (300) | $Z_t^T$ | 75 | 72,5 | 70 | 68,5 | 67 | 66 | 65 | 64 | 63 | 62 |
| | | | 598 | $A_t^T$ | 23 | 22 | 21 | 20,5 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| | | | (325) | $Z_t^T$ | 70 | 67,5 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 64 | 63 | 62 |
| | | | 623 | $A_t^T$ | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| | | | (350) | $Z_t$ | 77 | 75 | 73 | 70 | 67 | 65 | 62 | 61 | 60 | 60 |

*Продолжение табл. П6.3*

| Марка стали, сплава | $R^{20}_{p0,2}$, МПа (кгс/мм²) | $R^{20}_{m}$, МПа (кгс/мм²) | Температура, К (°С) | Пластичность, % | Время, ч | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 10 | 30 | $10^2$ | $3\cdot10^2$ | $10^3$ | $3\cdot10^3$ | $10^4$ | $3\cdot10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| 03Х16Н9М2 | ⩾200 (20) | ⩾520 (53) | 723 (450) | $A_t^T$ | — | — | — | 38,5 | 33,5 | 30,5 | 27,5 | 25,5 | 24,0 | 23,0 |
| | | | 773 (500) | $A_t^T$ | 41,0 | 37,0 | 33,0 | 30,5 | 27,5 | 26,0 | 24,5 | 23,0 | 22,0 | 21,5 |
| | | | 823 (550) | $A_t^T$ | 34,0 | 29,5 | 28,5 | 26,5 | 25,0 | 24,0 | 22,5 | 22,0 | 22,0 | 21,5 |
| | | | 873 (600) | $A_t^T$ | 29,5 | 28,0 | 26,0 | 25,0 | 24,0 | 23,5 | 23,0 | 23,5 | 24,5 | 25,0 |
| | | | 923 (650) | $A_t^T$ | 27,0 | 26,0 | 25,0 | 24,5 | 24,5 | 25,0 | 26,0 | 28,0 | 30,5 | 33,5 |
| 10Х2М* | ⩾245 (25) | ⩾392 (40) | 723 (450) | $A_t^T$ | 17,0 | 16,5 | 16,5 | 15,0 | 13,0 | 15,0 | 16,0 | 17,0 | 20,0 | 20,0 |
| | | | | $Z_t^T$ | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 | 55,0 |
| | | | 773 (500) | $A_t^T$ | 18,0 | 17,0 | 16,0 | 15,5 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,5 | 16,0 | 16,0 |
| | | | | $Z_t^T$ | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 |
| | | | 783 (510) | $A_t^T$ | 18,0 | 17,0 | 16,0 | 15,5 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,5 | 16,0 | 16,0 |
| | | | | $Z_t^T$ | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 |
| 09Х18Н9 | ⩾196 (20) | ⩾490 (50) | 773 (500) | $A_t^T$ | 28 | 25 | 21 | 16 | 15 | 14 | 12 | 11 | 9 | 8 |
| | | | | $Z_t^T$ | 44 | 38 | 33 | 29 | 25 | 22 | 19 | 17 | 14 | 13 |
| | | | 823 (550) | $A_t^T$ | 29 | 24 | 20 | 17 | 14 | 12 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | | | $Z_t^T$ | 46 | 40 | 34 | 30 | 26 | 23 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| | | | 873 (600) | $A_t^T$ | 22 | 18 | 17 | 22 | 27 | 24 | 15 | 10 | 7 | 5 |
| | | | | $Z_t^T$ | 33 | 31 | 34 | 42 | 32 | 23 | 16 | 13 | 17 | 9 |
| 09Г2С | ⩾245 (25) | ⩾432 (44) | 673 (400) | $A_t^T$ | 29 | 32 | 34 | 36 | 37 | 38 | 37 | 36 | 31 | 32 |
| | | | | $Z_t^T$ | 44 | 46 | 48 | 52 | 52 | 52 | 51 | 49 | 46 | 44 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 723 | $A_t^T$ | 54 | 51 | 48 | 46 | 43 | 40 | 37 | 34 | 30 | 28 |
| | | | (450) | $Z_t^T$ | 67 | 64 | 60 | 57 | 54 | 50 | 46 | 42 | 38 | 36 |
| | | | 773 | $A_t^T$ | 53 | 52 | 51 | 50 | 50 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 |
| | | | (500) | $Z_t^T$ | 62 | 62 | 59 | 56 | 53 | 50 | 47 | 43 | 39 | 37 |
| 16ГНМА | ⩾323 | ⩾490 | 723 | $A_t^T$ | 26 | 23 | 21 | 18 | 15 | 12 | 10 | 7 | 5 | 4 |
| | (33) | (50) | (450) | $Z_t^T$ | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12ХМ | ⩾235 | ⩾441 | 773 | $A_t^T$ | 34 | 34 | 34 | 34 | 24 | 18 | 16 | 18 | 26 | 26 |
| | (24) | (45) | (500) | $Z_t^T$ | 70 | 70 | 59 | 42 | 33 | 28 | 30 | 35 | 37 | 44 |
| | | | 823 | $A_t^T$ | 26 | 22 | 20 | 20 | 21 | 23 | 27 | 33 | 40 | 44 |
| | | | (550) | $Z_t^T$ | 59 | 46 | 34 | 30 | 29 | 31 | 36 | 40 | 46 | 50 |

* Приведены минимальные значения характеристик пластичности.

Таблица П6.4. **Средние значения условных пределов длительной пластичности сварочных материалов**

| Марка стали | Температура, К (°С) | Пластичность, % | Время, ч | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 10 | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $2 \cdot 10^5$ |
| Электрод для ручной дуговой сварки | 803 | $A_t^T$ | 20 | 18 | 13 | 8 | 8 | 8 |
| | (530) | $Z_t^T$ | 45 | 35 | 30 | 14 | 14 | 14 |
| 48А-1 | 873 | $A_t^T$ | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 |
| 48А-2 | (600) | $Z_t^T$ | 50 | 45 | 25 | 16 | 16 | 16 |

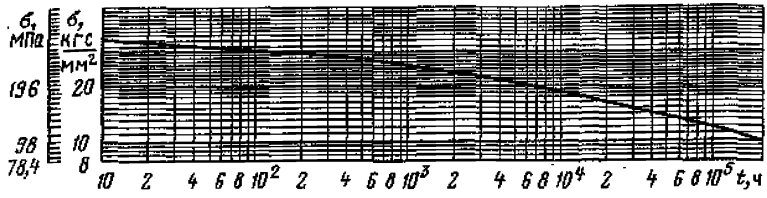



Рис. П6.1. Кривая длительной прочности стали марки 15ХМ при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=235$ МПа (24 кгс/мм$^2$); $R^{20}_{m}=441$ МПа (45 кгс/мм$^2$)]

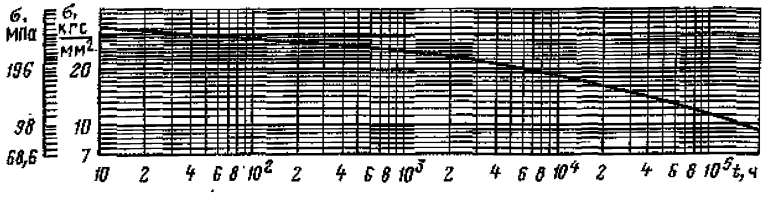



Рис. П6.2. Кривая длительной прочности стали марки 12МХ при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=235$ МПа (24 кгс/мм$^2$); $R^{20}_{m}=441$ МПа (45 кгс/мм$^2$)]

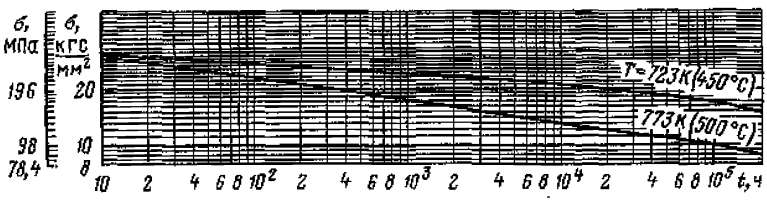



Рис. П6.3. Кривая длительной прочности сталей марки 10Х2М при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=245$ МПа (25 кгс/мм$^2$); $R^{20}_{m}=392$ МПа (40 кгс/мм$^2$)]

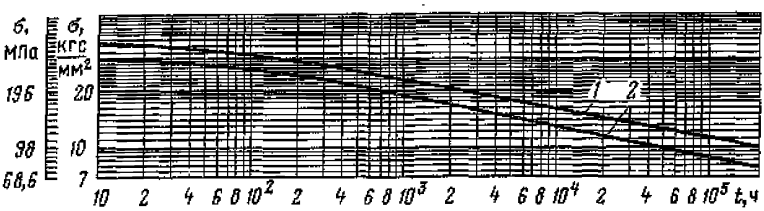



Рис. П6.4. Кривые длительной прочности стали марки 12Х2М1:
1 — $T=773$ К (500° С); $[R^{20}_{p0,2}=343$ МПа (35 кгс/мм$^2$); $R^{20}_{m}=539$ МПа (55 кгс/мм$^2$);
2 — $T=773$ К (500° С); $R^{20}_{p0,2}=255$ МПа (26 кгс/мм$^2$); $R^{20}_{m}=451$ МПа (46 кгс/мм$^2$)

при определении допускаемых напряжений при выборе основных размеров элементов конструкций в соответствии с разд. 3.2 Норм;

в расчетах элементов конструкций на прогрессирующее формоизменение, разд. 5.10 Норм;

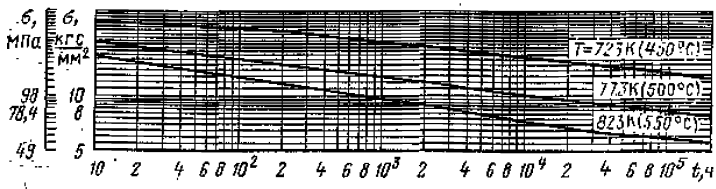



Рис. П6.5. Кривые длительной прочности стали марки 10Х2М1ФБ при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=196$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=343$ МПа (35 кгс/мм$^2$)]

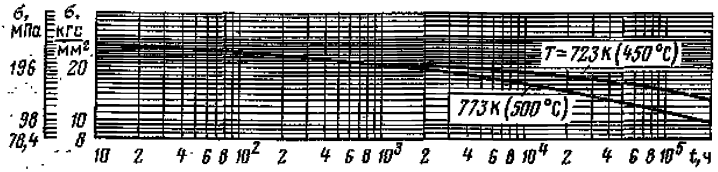



Рис. П6.6. Кривые длительной прочности стали марки 12Х1МФ при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=274$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=441$ МПа (45 кгс/мм$^2$)]

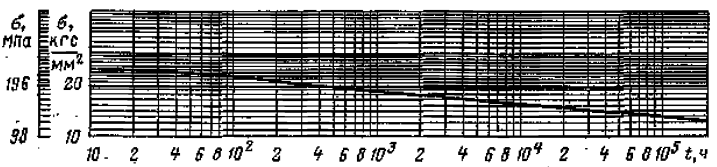



Рис. П6.7. Кривая длительной прочности стали марки 15Х1М1Ф при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=314$ МПа (32 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=490$ МПа (50 кгс/мм$^2$)]

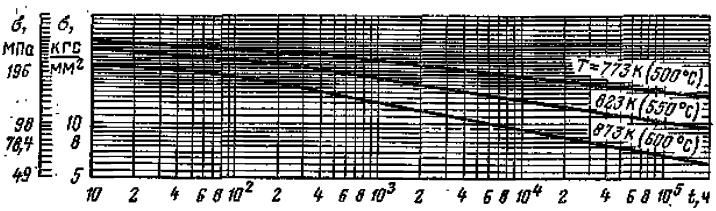



Рис. П6.8. Кривые длительной прочности стали марки 12Х18Н9 при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=196$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=490$ МПа (50 кгс/мм$^2$)]

в расчетах на длительную статическую и длительную циклическую прочность, разд. 5.7, 5.9 Норм.

## 3. МЕТОД ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

3.1. Метод предназначен для получения пределов длительной прочности для заданного уровня вероятности разрушения $P$

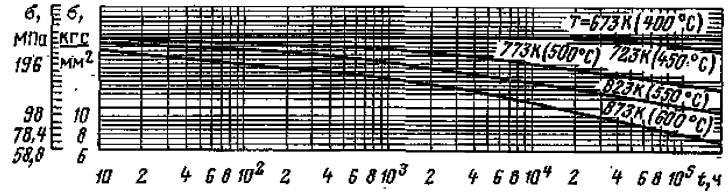



Рис. П6.9. Кривые длительной прочности сталей 10Х18Н10Т, 12Х18Н12Т при различных температурах $[R^{20}_{p0,2}=216$ МПа (22 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=529$ МПа (54 кгс/мм$^2$)]

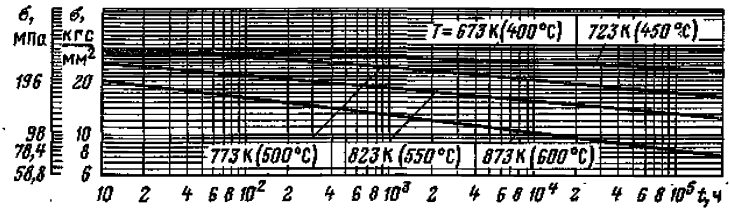



Рис. П6.10. Кривые длительной прочности стали марки 08Х16Н11М3 при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=196$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=510$ МПа (52 кгс/мм$^2$)]

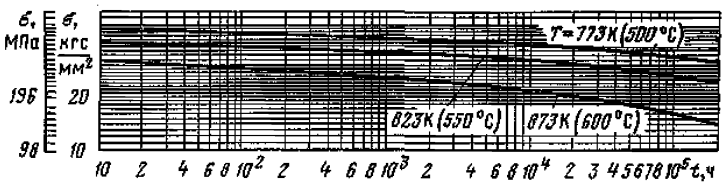



Рис. П6.11. Кривые длительной прочности сплава марки ХН35ВТ при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=392$ МПа (40 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=736$ МПа (75 кгс/мм$^2$)]

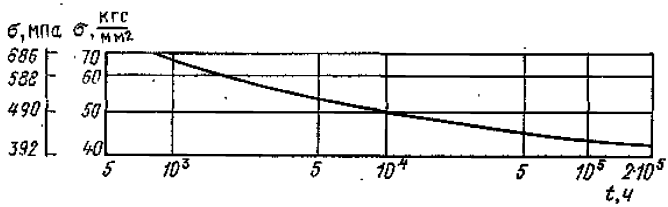



Рис. П6.12. Кривая длительной прочности сплава марки 1Х16Н36МБТЮР при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=392$ МПа (40 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=785$ МПа (80 кгс/мм$^2$)]

конструкционных материалов для сроков службы до $10^5 \div 2\cdot 10^5$ ч по данным опытов на длительный разрыв ограниченной (около $10^4$ ч) продолжительности. Реализация метода основана на определении при температуре $T_1$ разрушающего

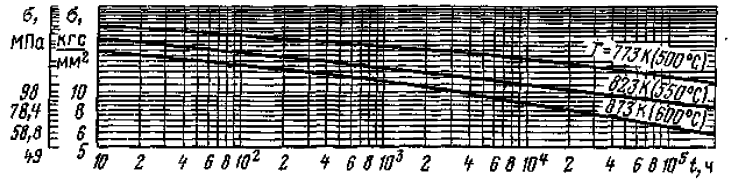



Рис. П6.13. Кривые длительной прочности сталей марок 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=196$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=510$ МПа (52 кгс/мм$^2$)]

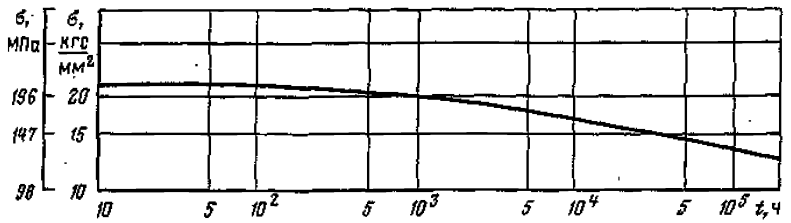



Рис. П6.14. Кривая длительной прочности стали марки 12Х18Н12М3ТЛ при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=216$ МПа (22 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=491$ МПа (510 кгс/мм$^2$)]

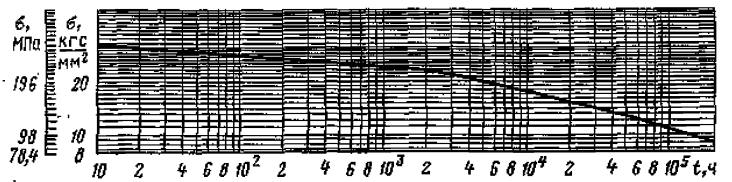



Рис. П6.15. Кривая длительной прочности стали марки 20ХМЛ при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=245$ МПа (25 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=441$ МПа (45 кгс/мм$^2$)]

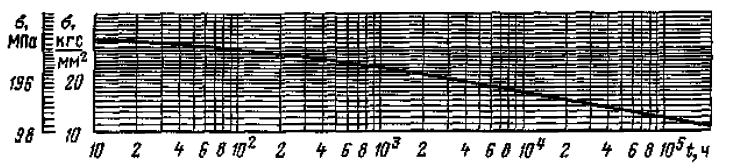



Рис. П6.16. Кривая длительной прочности стали марки 20ХМФЛ при $T=773$ К (500° С) $[R^{20}_{p0,2}=294$ МПа (30 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=490$ МПа (50 кгс/мм$^2$)]

напряжения $R^{T}_{mt}$ за время $t^{T_1}_k$ по $n^{T_1}$ опытам, проведенным при температуре $T_1$, и $n^{T_2}$ опытам, проведенным при температуре $T_2$.

При обработке экспериментальных данных (определении кривых длительной прочности при температурах $T_1$ и $T_2$) используются опыты продолжительностью более 200 ч.

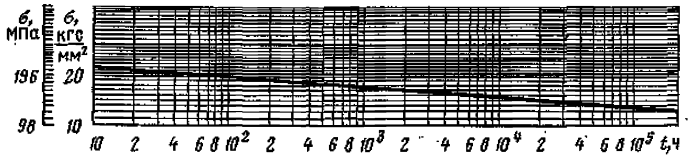



Рис. П6.17. Кривая длительной прочности стали марки 15Х1М1ФЛ при $T=773$ К (500° С) [$R^{20}_{p0,2}=314$ МПа (32 кгс/мм²); $R^{20}_{m}=490$ МПа (50 кгс/мм²)].

3.2. Зависимость изменения разрушающего напряжения $R^{T_j}_{mt}$ от времени $t^{T_j}_{к}$ при температуре $T_j$ ($j=1,2$) описывается уравнением

$$\lg R^{T_j}_{mt}=a^{T_j}_1+b^{T_j}_1(\lg t^{T_j}_k)^{3/2}, \qquad (П6.1)$$

где $a^{T_j}_1$, $b^{T_j}_1$ — постоянные коэффициенты.

3.3. Для пояснения сущности метода и принятых обозначений на рис. П6.30 приведен способ его графической реализации.

Результаты испытаний на длительную прочность при температурах $T_1$ и $T_2$ на рис. П6.30 изображены в виде точек в стандартной системе координат $\lg\sigma-\lg t$.

3.4. По экспериментальным точкам проводят средние линии длительной прочности при температурах $T_1$ и $T_2$, которые в соответствии с (П6.1) изображаются в общем случае криволинейными отрезками. Кривая *1* (рис. П6.30) соответствует температуре испытания $T_1$, кривая *2* — $T_2$.

3.5. Для максимального времени испытания $t^{T_1}_{max}$ при температуре $T_1$ по кривой *1* определяется напряжение $\sigma^{T_1}_{min}$ и по кривой *2* соответствующее этому напряжению время $t^{T_2}_m$.

3.6. Экстраполированную кривую длительной прочности при температуре $T_1$ и напряжениях, меньших $\sigma^{T_1}_{min}$, получают *переносом кривой при* $T_2$ *вправо на расстояние* $\Delta\lg t^{(T_1, T_2)}$. *При* этом

$$\Delta\lg t^{(T_1, T_2)}=\lg t^{T_1}_{max}-\lg t^{T_2}_m=\lg\gamma_{д.п}. \qquad (П6.2)$$

3.7. В соответствии с (П6.2) предел длительной прочности при температуре $T_1$ и заданном времени $t^{T_1}_3$ определяется по кривой *2* при эквивалентном времени $t_{экв}$. При этом

$$t_{экв}=t^{T_1}_3/\gamma_{д.п}.$$

3.8. Все вычисления по данному методу экстраполяции проводятся в следующей последовательности: определение коэффициентов уравнения (П6.1) с использованием стандартных процедур метода наименьших квадратов; вычисление коэффициента экстраполяции $\gamma_{д.п}$ по формуле (П6.2), времени $t^{T_2}_m$ из уравнения

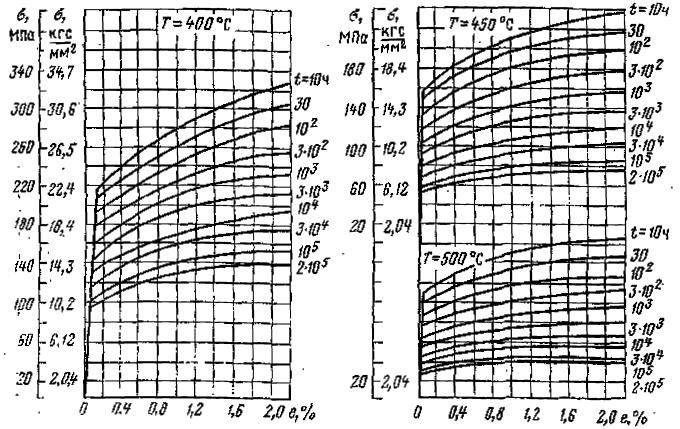



Рис. П6.18. Изохронные кривые ползучести стали марки 09Г2С при различной температуре $[R^{20}_{p0,2}=245$ МПа (25 кгс/мм$^2$); $R^{20}_{m}=432$ МПа (44 кгс/мм$^2$); $\sigma_{0,01}/\sigma_{0,5}=0,67]$

$$\lg t^{T}_{m2}=\left(\frac{\lg\sigma^{T}_{min}-a^{T}_{1}}{b^{T}_{1}}\right)^{2/3}, \qquad (П6.3)$$

определение экстраполированного предела длительной прочности при температуре $T_1$ и заданном ресурсе $t^{T_1}_{э}$ по формуле

$$\lg R^{T}_{mt}=a^{T}_{1}+b^{T}_{1}\lg^{3/2}\frac{t^{T_1}_{э}}{\gamma_{д.н}}. \qquad (П6.4)$$

3.9. Значения экстраполированного предела длительной прочности $R^{T_1}_{mt_э P}$ при температуре $T_1$ для заданной вероятности разрушения $P$ рассчитывают по формуле

$$\lg R^{T_1}_{mt_э P}=\lg R^{T_1}_{mt}+Z_P S_\sigma, \qquad (П6.5)$$

где $Z_P$ — квантиль уровня $P$ стандартного нормального распределения, определяемый согласно табл. П6.5.

Таблица П6.5. **Значение коэффициента $Z_P$ при различных значениях вероятности разрушения $P$**

| $P$ | 0,010 | 0,025 | 0,050 | 0,100 | 0,5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Z_P$ | −2,33 | −1,96 | −1,64 | −1,28 | 0,00 |

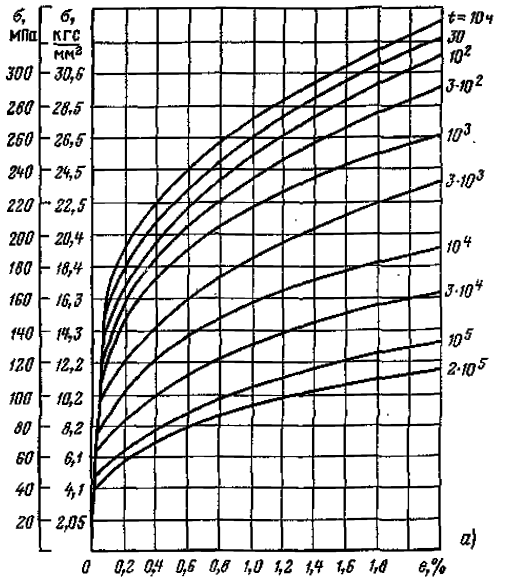



Рис. П6.19. Изохронные кривые ползучести сталей марок 15ХМ и 12ХМ
*а*—при $T=773$ К (500° С); *б*—при $T=823$ К (550° С)

Выборочное среднеквадратическое отклонение $S_\sigma$ вычисляют по формуле

$$S_\sigma=\left[\frac{(n^{T_1}-2)S_1^2+(n^{T_2}-2)S_2^2}{n^{T_1}+n^{T_2}-4}\right]^{1/2}, \qquad (П6.6)$$

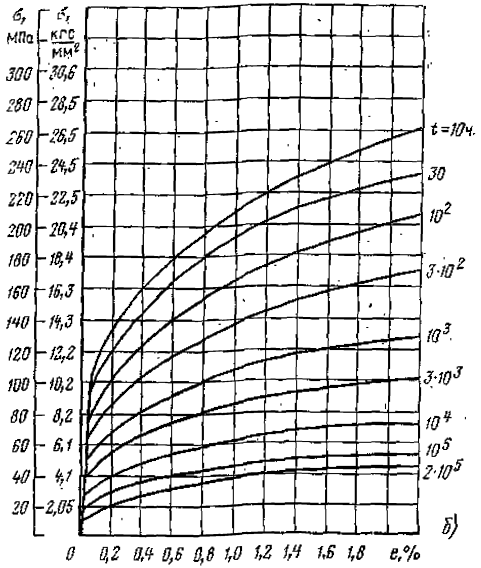
где

$$S_j^2=\frac{1}{n^{T_j}-2}\left[\sum_{i=1}^{n^{T_j}}\left[\lg R_{mli}^{T_j}-a_1^{T_j}-b_1^{T_j}(\lg t_l^{T_j})^{3/2}\right]\right];\ j=1,\ 2. \qquad (П6.7)$$

Рекомендуется минимальное (нормативное) значение предела длительной прочности определять для вероятности разрушения $P=0{,}01$.

## 4. МЕТОД ЭКСТРАПОЛЯЦИИ УСЛОВНЫХ ПРЕДЕЛОВ ПОЛЗУЧЕСТИ

4.1. Прогнозирование кривых ползучести может проводиться на основе экстраполяции пределов ползучести с применением




[$R^{20}_{p0,2}$=245 МПа (25 кгс/мм²); $R^{20}_{m}$=441 МПа (45 кгс/мм²); $\sigma_{0,01}/\sigma_{0,5}$=0,80]:

процедур, используемых в методе экстраполяции длительной прочности по разд. 3.

4.2. Уравнение для аппроксимации кривых условных пределов ползучести при температуре $T_j$ ($j$=1,2) имеет вид

$$\lg R_{ct A_3} = a^{T_j} + b^{T_j} \left(\lg t^{T_j}_{A_3}\right)^{3/2}, \qquad (П6.8)$$

где $a^{T_j}$, $b^{T_j}$ — коэффициенты.

Условные пределы ползучести определяются заменой в уравнениях (П6.1) — (П6.7) предела длительной прочности условным пределом ползучести, времени до разрушения — временем достижения заданной деформации $A_3$, $\gamma_{д.п} - \gamma_п$, при этом коэффициент $\gamma_п$ определяется по максимальному времени достижения заданной деформации $A_3$ с помощью процедур, аналогичных описанным для метода длительной прочности в разд. 3.

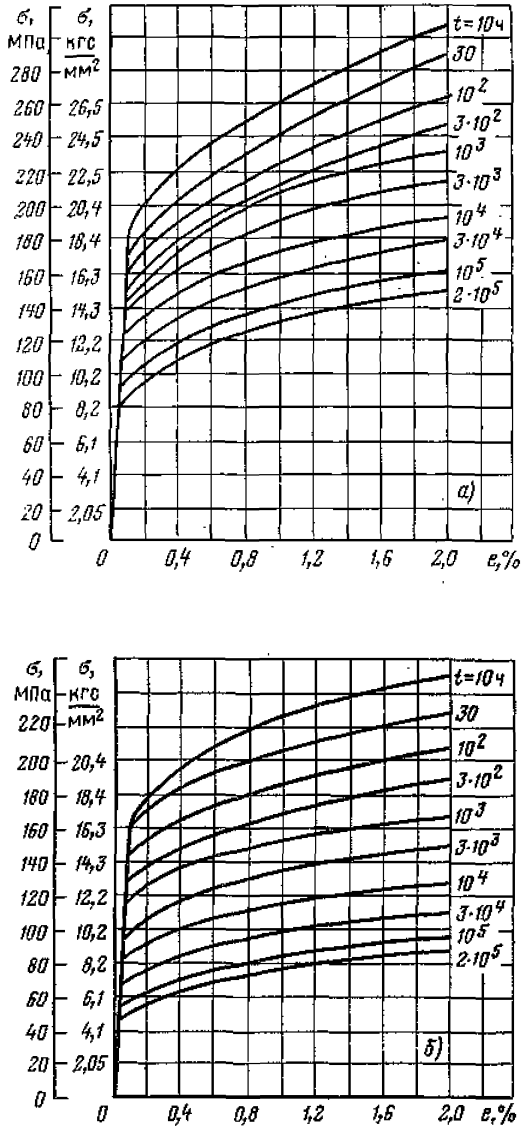
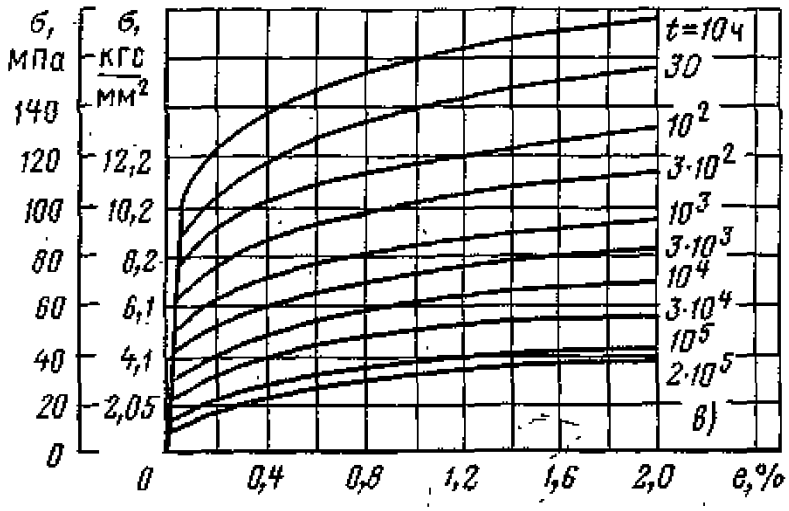
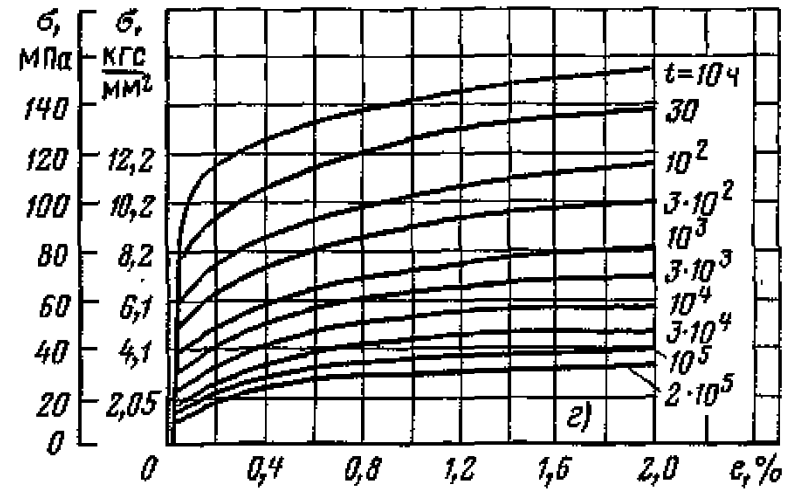
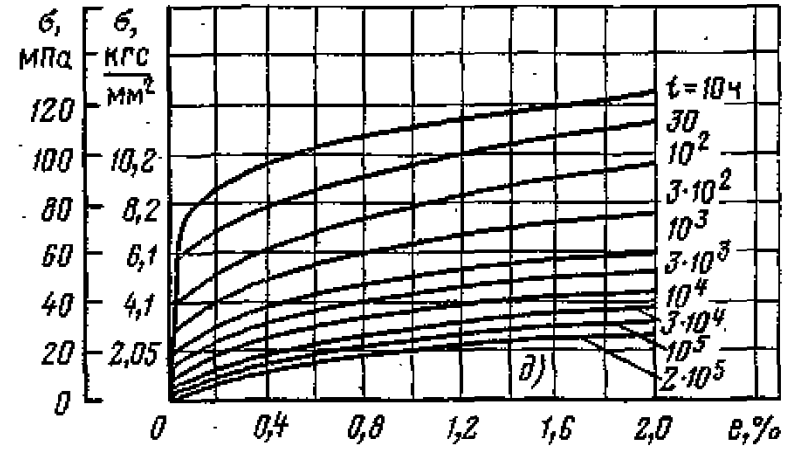



Рис. П6.20. Изохронные кривые ползучести стали марки 12Х2М [$R^{20}_{p0,2}$ = = 245 МПа (25 кгс/мм²); $R^{20}_m$ = 392 МПа (40 кгс/мм²); $\sigma_{0,01}/\sigma_{0,5}$ = 0,8]: *а* — $T$ = 723 К (450° С); *б* — при $T$ = 773 К (500° С); *в* — при $T$ = 823 К (550° С); *г* — при $T$ = 838 К (565° С); *д* — при $T$ = 873 К (600° С)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
140
120
100
80
60
40
20
0
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%
t=10ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
в)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
140
120
100
80
60
40
20
0
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%
t=10ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
г)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
120
100
80
60
40
20
0
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%
t=10ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
д)

4.3. Для прогнозирования пределов ползучести испытания на ползучесть для каждой партии металла проводят при температурах $T_1$ и $T_2 = T_1 + 50$ К (°С) (см. разд. 2.8).

По результатам испытаний на ползучесть строят кривые деформирования (первичные кривые ползучести) в координатах $e - t$ в соответствии с ГОСТ 3248—81. Рекомендуется для получения средней линии установившейся ползучести обрабатывать кривые ползучести по методу наименьших квадратов, принимая за случайную величину $y = e$ и за независимую $x = t_3$.

По кривой ползучести находят $t_3$, соответствующее заданному остаточному удлинению.

4.4. При необходимости получения изохронных кривых ползучести рекомендуется уровень напряжений для каждого порядка по времени устанавливать равным 0,85; 0,7; 0,55 $\sigma^T_{min}$ по результатам испытаний на длительную прочность данной партии металла

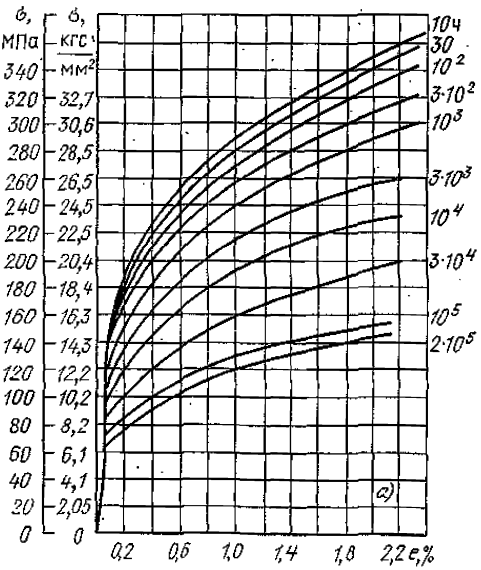
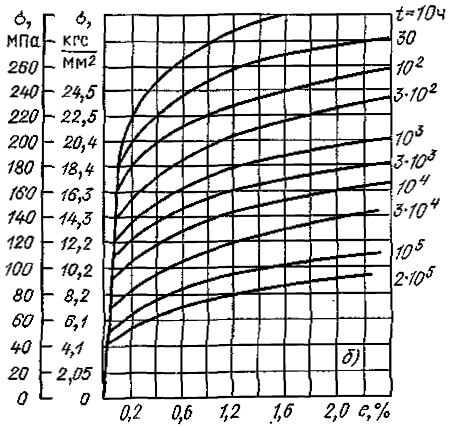
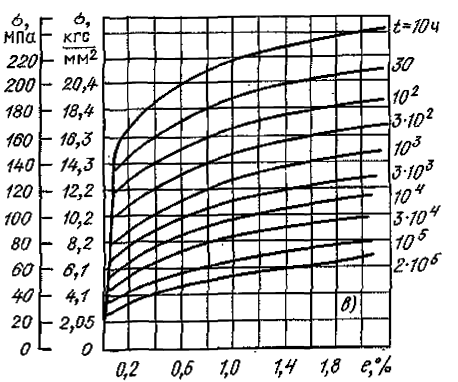



Рис. П6.21. Изохронные кривые ползучести стали марки 15Х1М1Ф [$R^{20}_{p0,2}$ = =314 МПа (32 кгс/мм²); $R^{20}_m$ = 490 МПа (50 кгс/мм²)]:
*а* — при $T$ = 773 К (500° С); *б* — при $T$ = 813 К (540° С); *в* — при $T$ = 843 К (570° С)

Изохронные кривые ползучести $(\sigma-e)$ строят по параметру $t$ на длительности 10, 30, $10^2$, $3\cdot10^2$, $10^3$, $3\cdot10^3$, $10^4$, $3\cdot10^4$, $10^5$, $2\cdot10^5$ ч.

4.5. Для каждой партии металла, испытанной при температурах $T_1$ и $T_2$, строят кривые ползучести в координатах $\lg t_э - \lg\sigma$, по которым и определяют условный предел ползучести методом экстраполяции, изложенным в разд. 3.



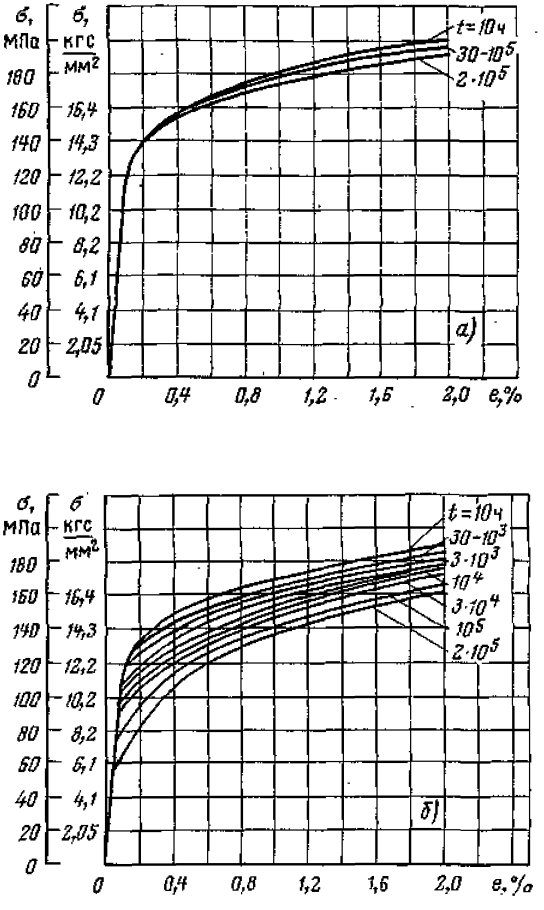
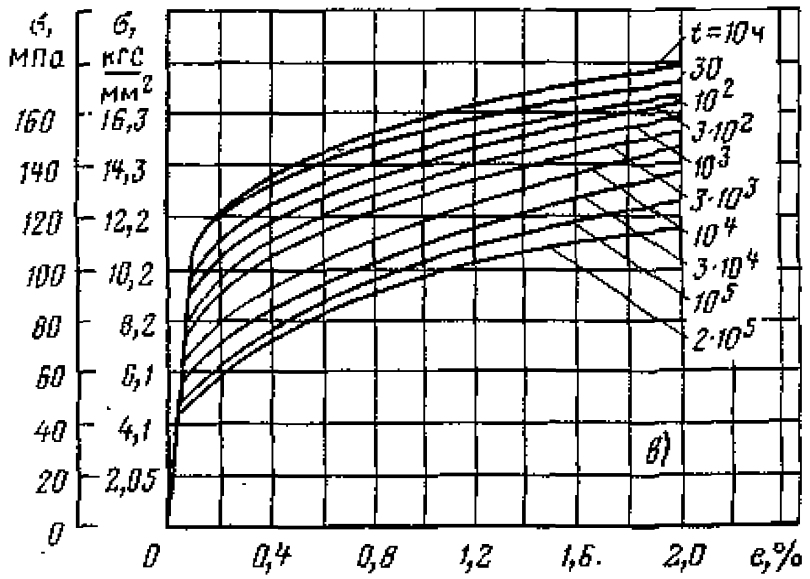
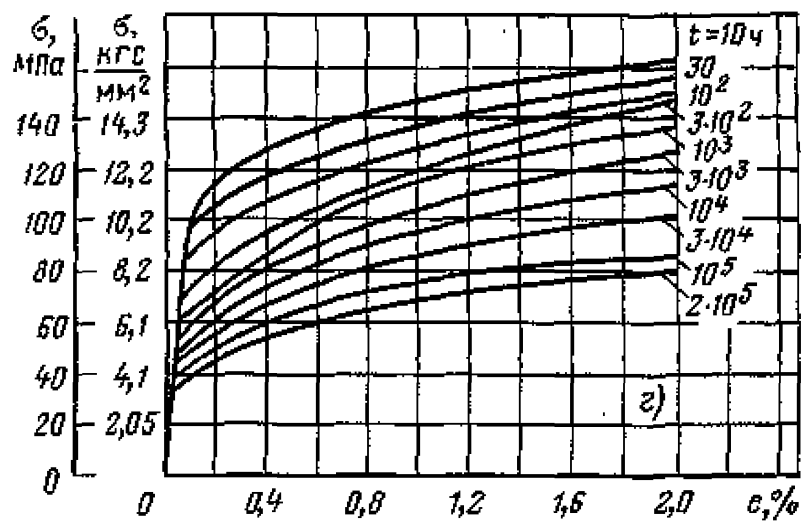
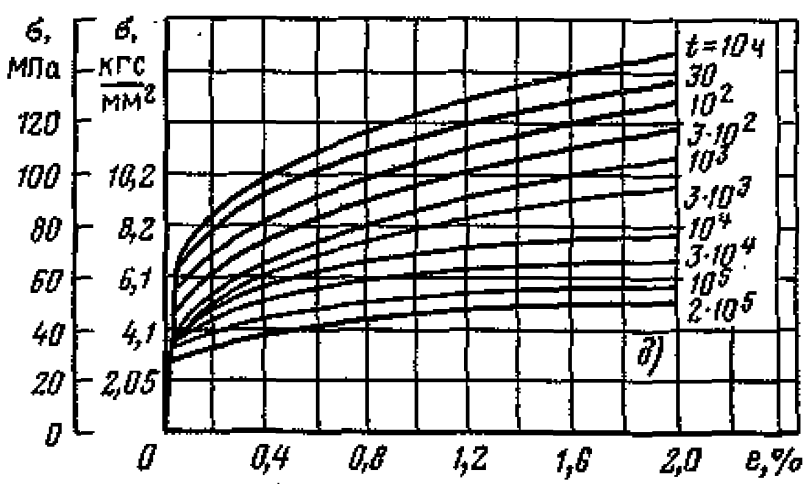



Рис. П6.22. Изохронные кривые ползучести стали марки 12Х18Н9 [$R^{20}_{p0,2}$ = =196 МПа (20 кгс/мм²); $R^{20}_{m}$ = 490 МПа (50 кгс/мм²)]:
*а* — при $T$=723 К (450° С); *б* — при $T$=773 К (500° С); *в* — при $T$=823 К (550° С); *г* — при $T$=873 К (600° С); *д* — при $T$=923 К (650° С)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
160
140
120
100
80
60
40
20
0
16,3
14,3
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
t=10ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
в)
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%


σ, МПа
σ, кгс/мм²
140
120
100
80
60
40
20
0
14,3
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
t=10ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
г)
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%


σ, МПа
σ, кгс/мм²
120
100
80
60
40
20
0
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
t=10ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
д)
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%

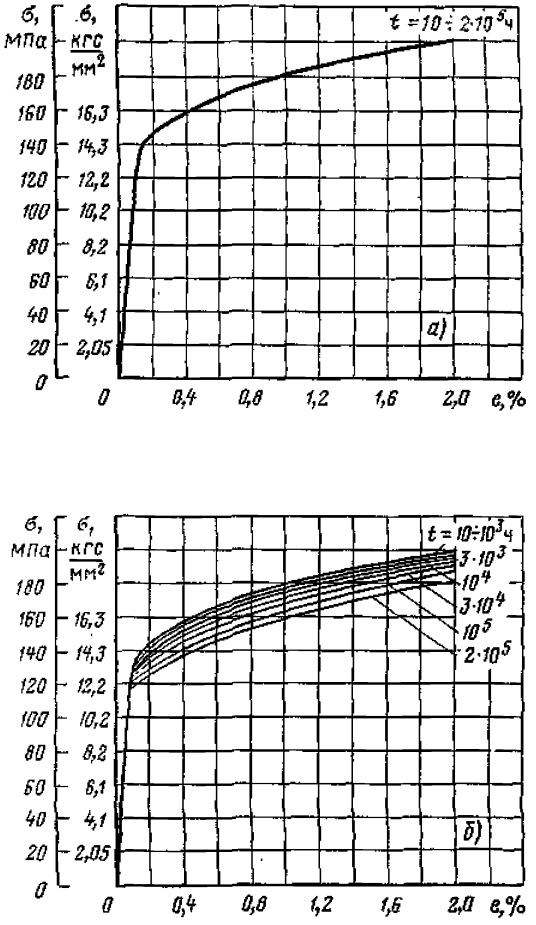
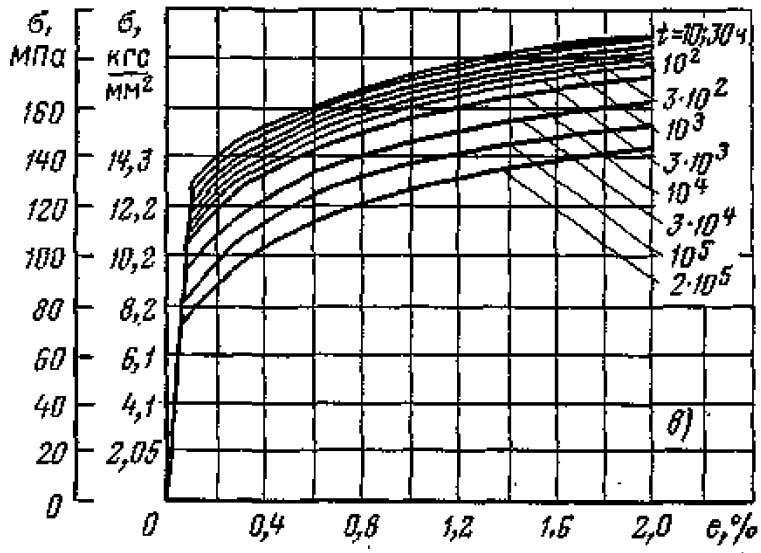
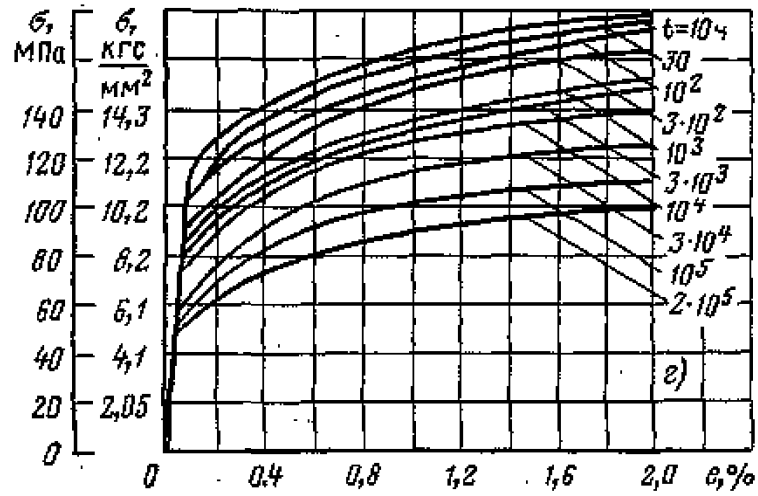
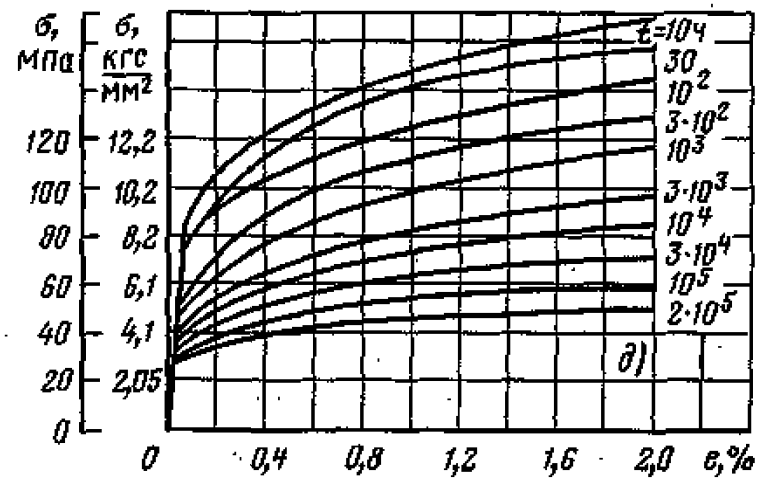


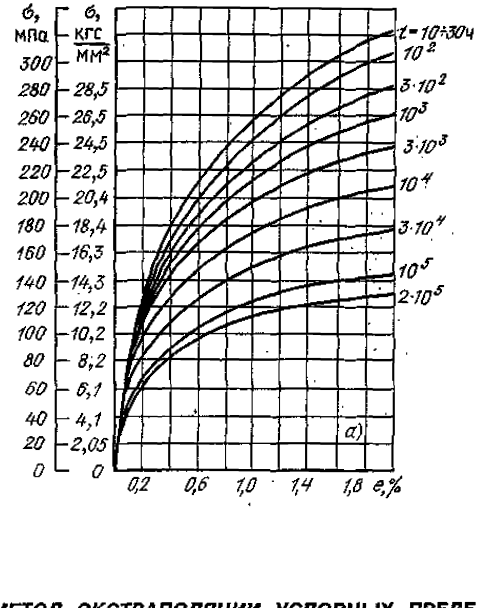

Рис. П6.23. Изохронные кривые ползучести сталей марок 08Х16Н11М3, 08Х16Н9М2, 12Х18Н12Т, 12Х18Н10Т $[R^{20}_{p0,2} = 196$ МПа (20 кгс/мм²); $R^{20}_{m} = 510$ МПа (52 кгс/мм²)]:

*а* — при $T = 723$ К (450° С); *б* — при $T = 773$ К (500° С); *в* — при $T = 823$ К (550° С); *г* — при $T = 873$ К (600° С); *д* — при $T = 923$ К (650° С)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
160
140
120
100
80
60
40
20
0
14,3
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%
t=10; 30 ч
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
в)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
140
120
100
80
60
40
20
0
14,3
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%
t=10⁴ ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
г)


σ, МПа
σ, кгс/мм²
120
100
80
60
40
20
0
12,2
10,2
8,2
6,1
4,1
2,05
0
0,4
0,8
1,2
1,6
2,0
ε,%
t=10⁴ ч
30
10²
3·10²
10³
3·10³
10⁴
3·10⁴
10⁵
2·10⁵
д)




## 5. МЕТОД ЭКСТРАПОЛЯЦИИ УСЛОВНЫХ ПРЕДЕЛОВ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

5.1. Для получения характеристик длительной пластичности проводят испытания образцов на длительную прочность при температурах $T_1$ (см. разд. 2.8) и $T_2$ при условии $T_2 - T_1 \approx 50$ К (°С).

Измерения относительных остаточных удлинения и сужения проводят по ГОСТ 10145—81. Результаты испытаний обрабатывают в координатах $\lg A_t^T(\lg Z_t^T) - \lg t_к^T$.

5.2. Предлагаемый метод экстраполяции предназначен для определения при температуре $T_1$ характеристик длительной пластичности $(A_{t_э,р}^{T_1}, Z_{t_э,р}^{T_1})$ за заданный ресурс $t_э^{T_1}$ по $n^{T_1}$ опытам при температуре $T_1$ и $n^{T_2}$ опытам при температуре $T_2$.

5.3. Зависимость остаточного удлинения от времени описывается уравнениями

$$\lg A_t^{T_1} = a_3^{T_1} + b_3 \lg t_к^{T_1} + c(\lg t_к^{T_1})^2; \qquad (П6.9)$$

$$\lg A_t^{T_2} = a_3^{T_2} + b_3 \lg \gamma_{д.п} t_к^{T_2} + c(\lg \gamma_{д.п} t_к^{T_2})^2; \qquad (П6.10)$$

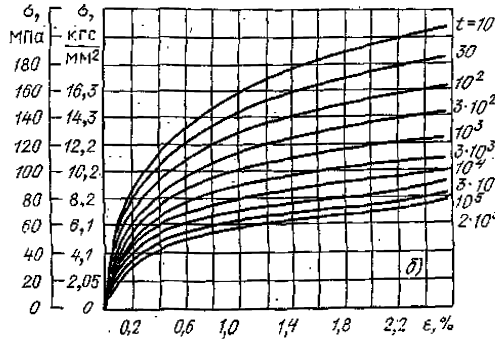



Рис. П6.24. Изохронные кривые ползучести стали марки 12Х1МФ: $[R^{20}_{p0,2}=$ $=274$ МПа (28 кгс/мм$^2$); $R^{20}_m=441$ МПа (45 кгс/мм$^2$); $\sigma_{0,01}/\sigma_{0,5}=0{,}73]$: *а* — при $T=773$ К (500° С); *б* — при $T=823$ К (550° С)

где $a^T_{3\,1}$, $a^T_{3\,2}$, $b$ и $c$ — постоянные коэффициенты; коэффициент экстраполяции $\gamma_{д.п}$ определяется формулой (П6.2). Аналогичные уравнения принимаются для остаточного сужения.

5.4. Для пояснения идеи метода на рис. П6.31 приведен способ его графической реализации. На этом рис. в координатах $\lg A^T_t - \lg t$ результаты испытаний при температурах $T_1$ и $T_2$ изображены в виде точек. При экстраполяции кривых длительной пластичности экспериментальные точки при температуре $T_2$ переносятся вправо на расстояние $\lg\gamma_{д.п}$ и через полученные и экспериментальные точки при температуре $T_1$ проводятся эквидистантные параболы *1* и *2*. Пунктирная часть линии *1* представляет собой результат экстраполяции.

5.5. Коэффициенты уравнений (П6.9) и (П6.10) определяют по методу наименьших квадратов.

5.6. Для заданного ресурса $t_э$ и температуры $T_1$ условный предел остаточного удлинения $A^{T_1}_{t_э P}$ при вероятности разрушения $P$ определяют по формуле

$$\lg A^{T_1}_{t_э P}=a^{T_1}_3+b_3\lg t^{T_1}+c(\lg t^{T_1})^2+Z_P S_A. \qquad (П6.11)$$

Величины $Z_P$ для различных уровней $P$ приведены в табл. П6.5.

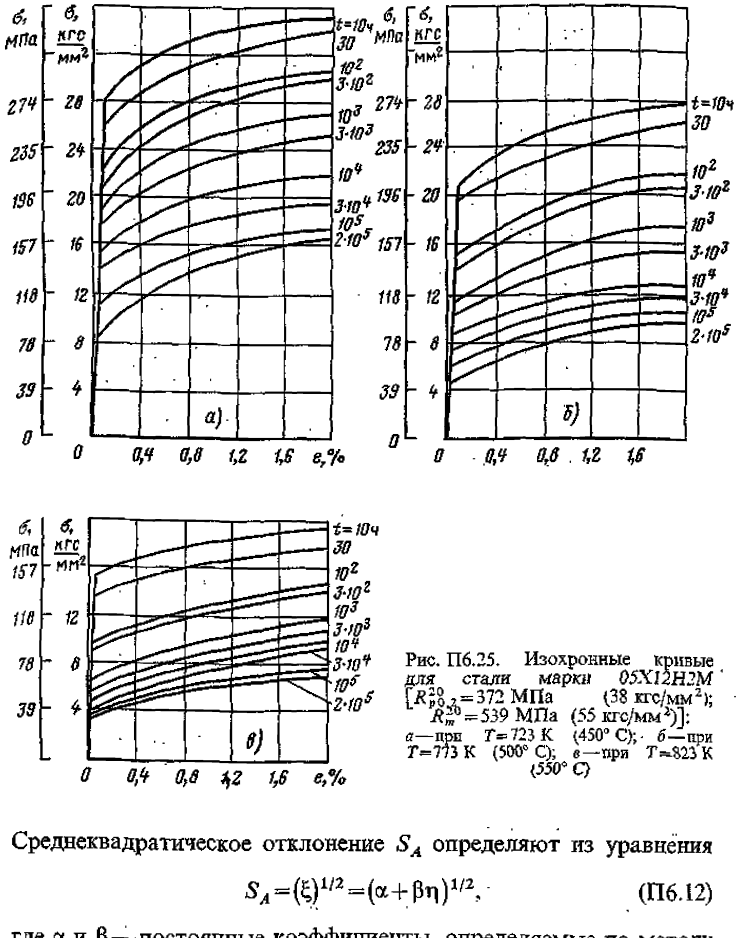



Рис. П6.25. Изохронные кривые для стали марки 05Х12Н2М [$R^{20}_{p0,2}$=372 МПа (38 кгс/мм²); $R^{20}_{m}$=539 МПа (55 кгс/мм²)]: *а* — при $T$=723 К (450° С); *б* — при $T$=773 К (500° С); *в* — при $T$=823 К (550° С)

Среднеквадратическое отклонение $S_A$ определяют из уравнения

$$S_A=(\xi)^{1/2}=(\alpha+\beta\eta)^{1/2}, \qquad (П6.12)$$

где $\alpha$ и $\beta$ — постоянные коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов по совокупности данных:

$$\xi_i=\left[\lg A^{T_j}-a^{T_j}-b_3\lg c_j t^{T_j}-c\left(\lg c_j t^{T_j}\right)^2\right]^2;$$

$$\eta_i=a^{T_j}+b_3\lg c_j t^{T_j}+c\left(\lg c_j t^{T_j}\right)^2;\ j=1,\ 2;\ 1\leqslant i\leqslant n^{T_1}+n^{T_2};$$

$$c_j=1 \text{ при } j=1;\ c_j=\gamma_{д/п} \text{ при } j=2.$$

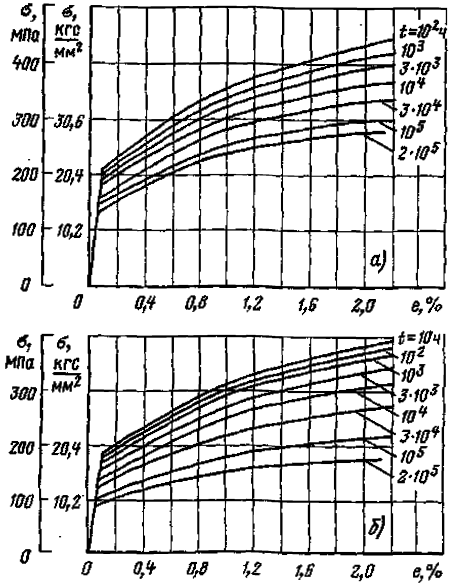



Рис. П6.26. Изохронные кривые ползучести стали марки 16ГНМА [$R^{20}_{p0,2}$ = = 323 МПа (33 кгс/мм²); $R^{20}_{m}$ = 493 МПа (50 кгс/мм²)]:
*а* — при $T$ = 673 К (400° С); *б* — при $T$ = 723 К (450° С)

*ПРИЛОЖЕНИЕ 7*
(рекомендуемое)

## РАСЧЕТ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

1. Метод расчета на длительную циклическую прочность для изотермического и неизотермического нагружения применим в интервале температур от $T_1$ (см. разд. 3.2 Норм) до 773 К (500° С) для деталей из легированных сталей, до 873 К (600° С) для деталей из коррозионностойких сталей аустенитного класса и железоникелевых сплавов и до 623 К (350° С) для деталей из сплавов циркония с 1 и 2,5% ниобия при числе циклов до $10^7$.

2. Положения, изложенные в разд. 5.3 и пп. 5.6.2, 5.6.3, 5.6.8, 5.6.16—5.6.21, 5.6.23 Норм следует применять при расчете на длительную циклическую прочность.

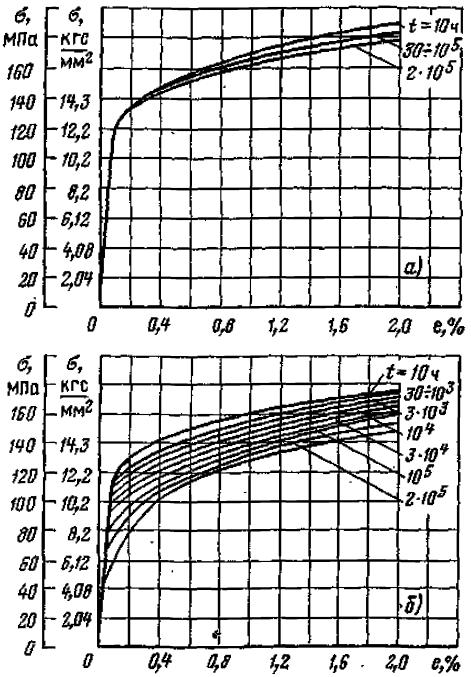


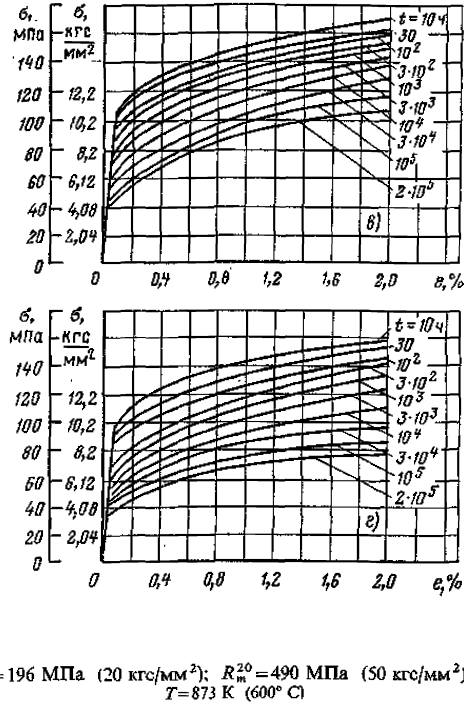

Рис. П6.27. Изохронные кривые ползучести стали марки 09Х18Н9 [$R^{20}_{p0,2}$ = *а* — при $T$=723 К (450° С); *б* — при $T$=773 К (500° С); *в* — при $T$=823 К (550° С); *г* — при

3. Определение допускаемой амплитуды условных упругих напряжений или допускаемого числа циклов следует проводить по формулам п. 5.6.6 Норм. При этом следует принять

$$R^T_c = R^T_{mt}\left(1 - Z^T_t\right)^{-1};\quad e^T_c = e^T_{mt};\quad R^T_{-1} = R^T_{-1t};\quad m = 0{,}5;$$

$$m_e = 0{,}132 \lg\left\{2{,}5\left[1 - Z^T_t\right]^{-1}\right\},$$

где $R^T_{mt}$ — предел длительной прочности при максимальной температуре цикла нагружения за время $t$, равное части рабочего ресурса рассматриваемой детали, отрабатываемого при температуре выше $T_t$ (см. разд. 3.2 Норм); $R^T_{-1t}$ — предел выносливости при максимальной температуре цикла и $10^7$ циклов нагружения за время $t$, принимаемый равным $0{,}4R^T_{mt}$; $e^T_{mt} = 1{,}15 \lg \dfrac{100}{100 - Z^T_{mt}}$ — характеристика длительной пластичности, определяемая равномерным сужением поперечного сечения $Z^T_{mt}$ при длительном статическом растяжении; значение $e^T_{mt}$ при-




$= 196$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R_m^{20} = 490$ МПа (50 кгс/мм$^2$)]:
$T = 873$ К (600° С)

нимается минимальным в интервале рабочих температур и длительности нагружения до $t$.

Если экспериментально обосновано, что $R^T_{-1t} > 0{,}4R^T_{mt}$, то показатель степени $m_e$ вычисляется по формуле $m_e = 0{,}132 \lg R^T_{mt} / \left[R^T_{-1t}\left(1 - Z^T_t\right)\right]$. Значения $R^T_{mt}$ принимают по табл. П6.1. Значения $Z^T_{mt}$ допускается определять по формуле $Z^T_{mt} = A^T_t/(100 + A^T_t)$, где $A^T_t$ — относительное удлинение образца при длительном статическом разрушении в интервале рабочих температур и длительности нагружения до $t$; при $A^T_t \leqslant 30\%$ допускается применять формулу $e^T_{mt} = 5 \cdot 10^{-3} A^T_t$. Значения $A^T_t$ и $Z^T_t$ принимают по табл. П6.3. Допускается определять $m_e$ и $R_c$ по формулам

$$m_e = 0{,}132 \lg R^T_{mt} / \left[R^T_{-1t}\left(1 - Z^T_{mt}\right)\right]; \quad R_c = R^T_{mt}/\left(1 - Z^T_{mt}\right).$$

4. В интервале температур 623—673 К (350—400° С) для легированных сталей, 723—773 К (450—500° С) для корро-

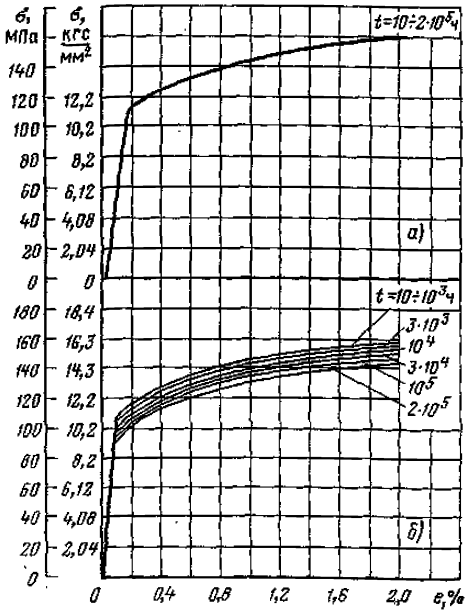



Рис. П6.28. Изохронные кривые ползучести стали марки 08Х18Н12Т [$R^{20}_{p0,2}$= *а*—при $T$=723 К (450° С); *б*—при $T$=773 К (500° С); *в*—при $T$=823 К (550° С); *г*—при

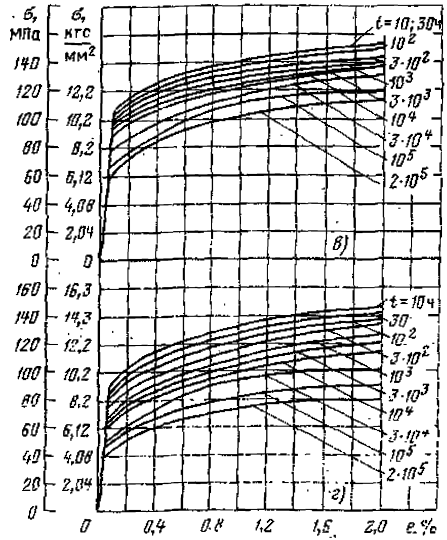
зионно-стойких сталей аустенитного класса и 523—573 К (250—300° С) для сплавов циркония значения $e^T_{mt}$ для промежуточных температур определяются линейной интерполяцией между значениями $e^T_c$ и $e^T_{mt}$ при наименьшей и наибольшей температурах интервалов соответственно. Для минимальных температур указанных интервалов значение $e^T_{mt}$ равно $e^T_c$, которое определяется по п. 5.6.6 Норм.

5. Расчетные кривые усталости легированных сталей при симметричном цикле приведены на рис. П7.1. Модуль упругости принят 184, 182, 180, 176, 172 ГПа при 623, 648, 673, 723 и 773 К (350, 375, 400, 450, 500° С) соответственно. Механические свойства при использовании кривых должны быть:

до 623 К (350° С) $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$; $R^T_m \geqslant 450$ МПа; $Z^T \geqslant 32\%$;

для $t \leqslant 2\cdot10^5$ ч:

до 673 К (400° С) $R^T_{mt} \geqslant 195$ МПа, $A^T_t \geqslant 16\%$;
до 723 К (450° С) $R^T_{mt} \geqslant 180$ МПа, $A^T_t \geqslant 15\%$;
до 773 К (500° С) $R^T_{mt} \geqslant 95$ МПа, $A^T_t \geqslant 16\%$;




$= 196$ МПа (20 кгс/мм$^2$); $R_m^{20} = 490$ МПа (50 кгс/мм$^2$)]:
$T = 873$ К (600° С)

Расчетные кривые усталости сталей аустенитного класса при симметричном цикле приведены на рис. П7.2. Модуль упругости принят равным 155, 152, 146, 147, 145 ГПа при 723, 748, 773, 823, 873 К (450, 475, 500, 550, 600° С) соответственно.

Механические свойства при использовании кривых должны быть:

до 723 К (450° С) $R_{p\,0,2}/R_m^T \leqslant 0{,}7$, $R_m^T \geqslant 350$ МПа, $Z^T \geqslant 45\%$;

для $t \leqslant 2 \cdot 10^5$ ч:

до 773 К (500° С) $R_{mt}^T \geqslant 166$ МПа, $A_t^T \geqslant 10\%$;

до 823 К (550° С) $R_{mt}^T \geqslant 117$ МПа, $A_t^T \geqslant 16\%$;

до 873 К (600° С) $R_{mt}^T \geqslant 107$ МПа, $A_t^T \geqslant 10\%$.

Расчетные кривые усталости железоникелевого дисперсионно-твердеющего сплава ХН35ВТ при симметричном цикле приведены на рис. П7.3. Модуль упругости принят равным 163, 162, 161, 158, 156 ГПа при 723, 748, 773, 823, 873 К (450, 475, 500, 550, 600° С) соответственно.

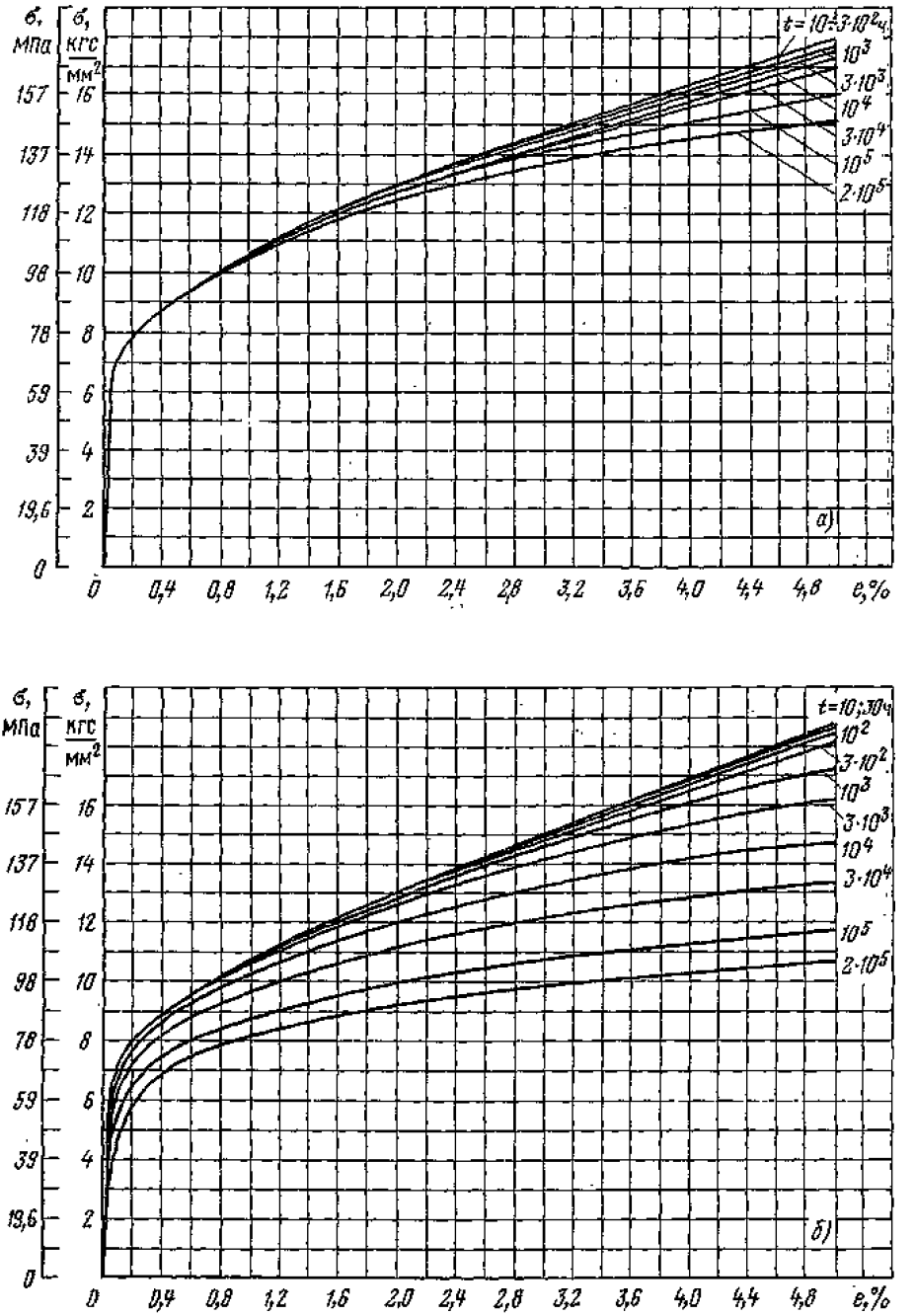
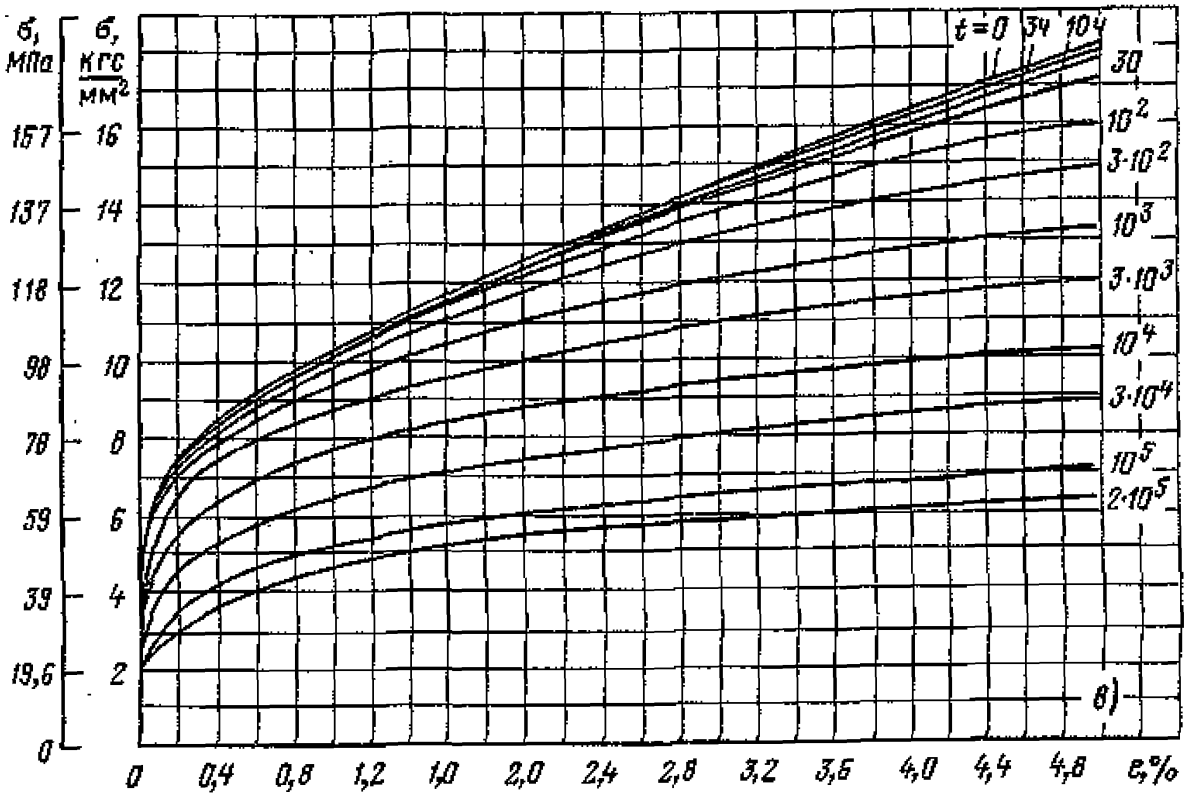
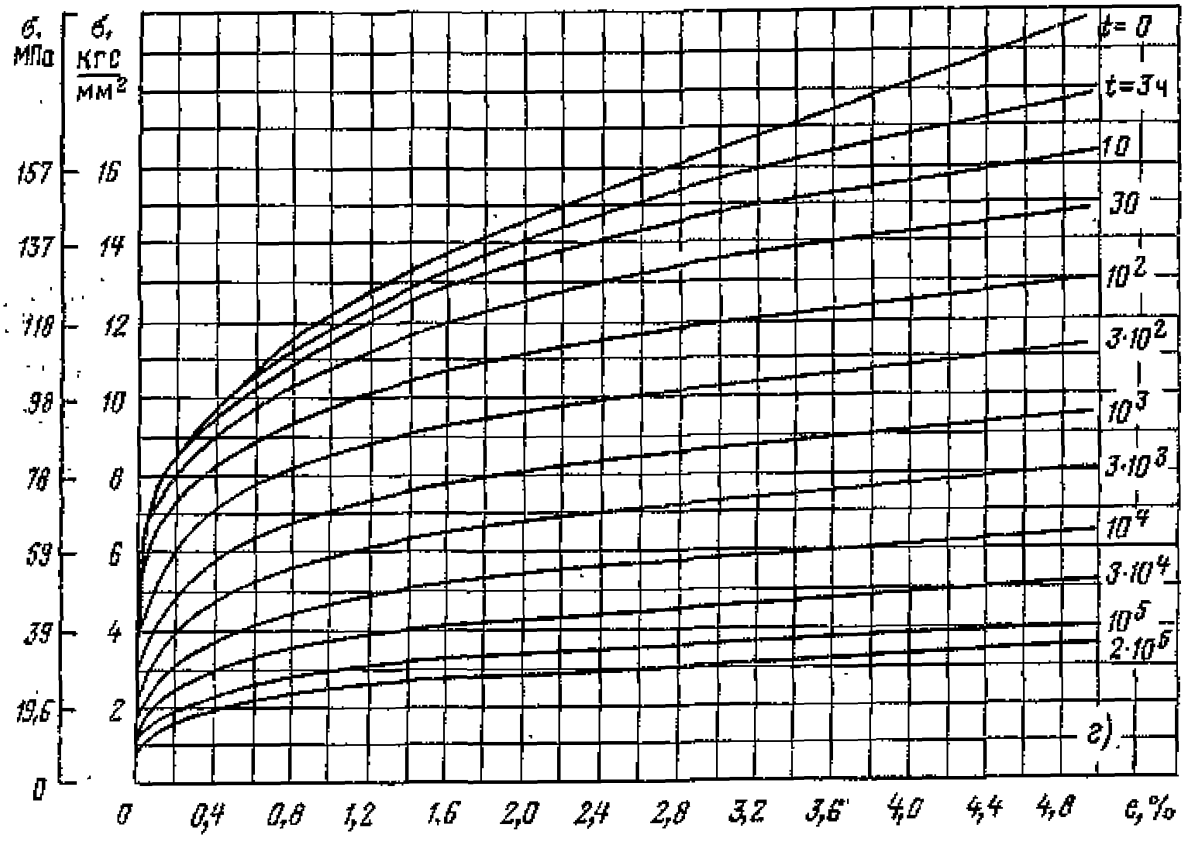



Рис. П6.29. Изохронные кривые ползучести стали марки 03Х16Н9М2 [$R^{20}_{p0,2}$ = *а* — при $T$=773 К (500° С); *б* — при $T$=823 К (550° С); *в* — при $T$=873 К (600° С); *г* — при




=200 МПа (21 кгс/мм²); $R^{20}$=520 МПа (53 кгс/мм²)]:
$T$=923 К (650° С)

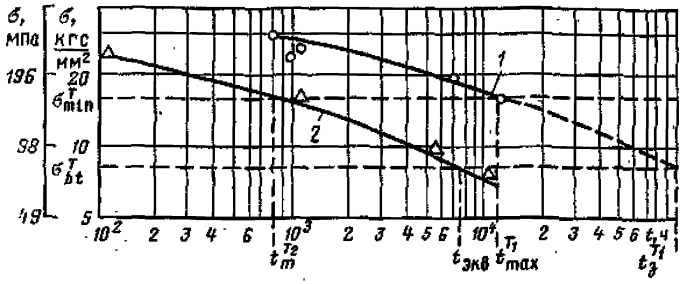



Рис. П6.30. График длительной прочности:
*1* — испытания при $T_1$; *2* — испытания при $T_2$

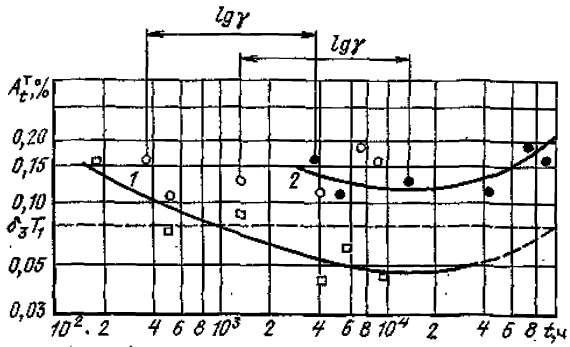



Рис. П6.31. График пределов остаточного удлинения: *1* — испытания при $T_1$ (□); *2* — испытания при $T_2$ (○), после пересчета (●)

Механические свойства при использовании кривых должны быть:

до 723 К (450° С) $R^T_{p0,2}/R^T_m \leqslant 0{,}7$; $R^T_m \geqslant 620$ МПа; $Z^T \geqslant 24\%$; для $t \leqslant 2 \cdot 10^5$ ч:

до 773 К (500° С) $R^T_{mt} \geqslant 240$ МПа, $A^T_t \geqslant 3\%$;

до 823 К (550° С) $R^T_{mt} \geqslant 210$ МПа, $A^T_t \geqslant 3\%$;

до 873 К (600° С) $R^T_{mt} \geqslant 115$ МПа, $A^T_t \geqslant 4\%$.

Расчетные кривые усталости сплава циркония с 2,5% ниобия при симметричном цикле приведены на рис. П7.4. Модуль упругости принят равным 75, 72, 69 ГПа при температурах 523, 573, 623 К (250, 300, 350° С) соответственно.

Механические свойства при использовании кривых должны быть:

до 523 К (250° С) $R^T_m \geqslant 335$ МПа; $Z^T \geqslant 57\%$;

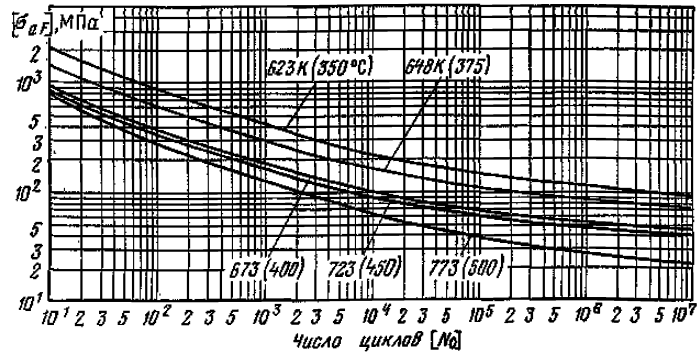



Рис. П7.1. Расчетные кривые усталости легированных сталей при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$

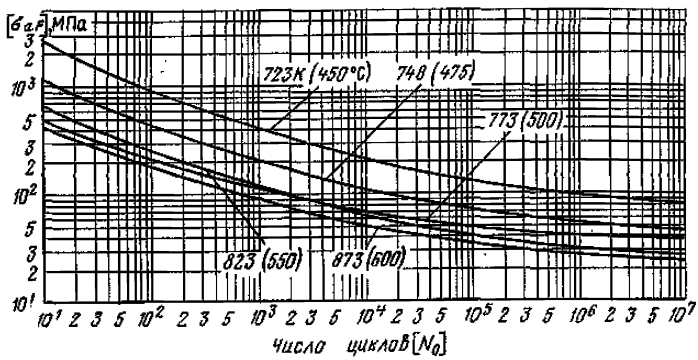



Рис. П7.2. Расчетные кривые усталости коррозионно-стойких сталей аустенитного класса при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

для $t \leqslant 2 \cdot 10^5$ ч:

до 573 К (300° С) $R_m^T \geqslant 205$ МПа, $A_l^T \geqslant 22\%$;

до 623 К (350° С) $R_m^T \geqslant 140$ МПа, $A_l^T \geqslant 24\%$;

При определении расчетных кривых на рис. П7.1 — П7.4 принято $n_\sigma = 2$ и $n_N = 10$.

Расчетные кривые для промежуточных температур могут быть получены интерполяцией напряжений.

6. При расчете элементов конструкций из однородных материалов или их зон, нагруженных только температурными напряжениями от радиальных перепадов температур (исключая

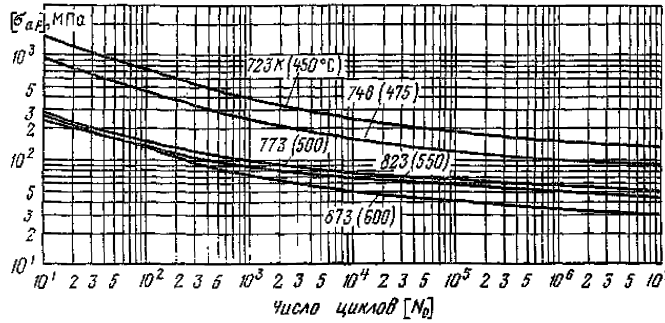



Рис. П7.3. Расчетные кривые усталости железоникелевых дисперсионно-твердеющих сплавов (ХН35ВТ) при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

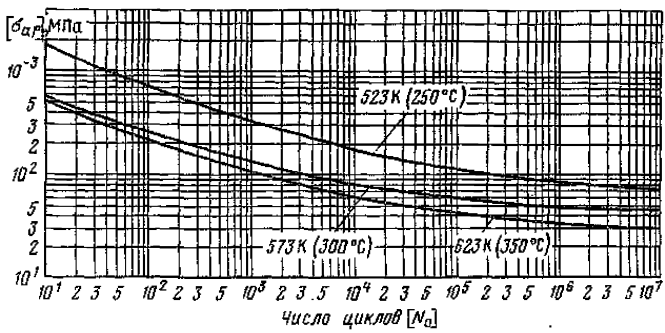



Рис. П7.4. Расчетные кривые усталости сплава циркония с 2,5% Nb при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

зоны краевого эффекта и изменения средней температуры), например тепловых экранов, разделительных оболочек и т. п., разрушение которых не приводит к выходу рабочей среды за пределы удерживающих ее несущих элементов, а также смешиванию натрия с водной средой, коэффициенты запаса при расчете этих элементов или их зон на длительную циклическую прочность в соответствии с пп. 3—5 настоящего приложения и формулам п. 5.6.6 Норм принимают равными $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 5$.

7. Если при расчете по пп. 2—5 настоящего приложения условия прочности или применимости кривых не удовлетворяются, то уточнение допускаемого числа циклов или допускаемых амплитуд местных напряжений, полученных по расчетным кривым усталости или формулам, может быть проведено

по формулам п. 5.6.6 Норм и пп. 3, 4 настоящего приложения на основе анализа процесса изменения температур и напряжений в рассматриваемой зоне детали в соответствии с нижеследующими пунктами.

8. Если нагружение при эксплуатации производится при различных температурах, то значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ могут быть определены с учетом нестационарности теплового режима. Значение $R^T_{mt}=(R^T_{mt})_{\text{пр}}$ принимают по кривой длительной прочности при максимальной температуре $(T_\sigma)_0$ цикла для длительности нагружения $(t_\sigma)_{\text{пр}} \leqslant t_0$:

$$(t_\sigma)_{\text{пр}} = \sum_{j=0}^{m} (\tau_\sigma)_j \frac{(t_\sigma)_0}{(t_\sigma)_j},$$

где $(\tau_\sigma)_j$ — общее время нагружения при температуре $(T_\sigma)_j$; $(t_\sigma)_j$ — время до разрушения по кривой длительной статической прочности при температуре $(T_\sigma)_j$ при напряжении $(R^T_{mt})$, вызывающем разрушение при температуре $(T_\sigma)_0$ за время $(t_\sigma)_0$.

Подобным способом определяют значение $e^T_{mt}$. Для получения $(t_e)_{\text{пр}}$ используется кривая изменения $e^T_{mt}$ при температуре $(T_e)_0$, приводящей к наибольшей потере пластичности при длительном статическом нагружении. Значение $e^T_{mt}=(e^T_{mt})_{\text{пр}}$ принимают по кривой ее изменения в зависимости от времени до длительного статического разрушения при температуре $(T_e)_0$ для длительности нагружения $(t_e)_{\text{пр}} \leqslant t_0$ (в общем случае $(t_\sigma)_{\text{пр}} \neq (t_e)_{\text{пр}}$):

$$(t_e)_{\text{пр}} = \sum_{j=0}^{m} (\tau_e)_j \frac{(t_e)_0}{(t_e)_j},$$

где $(\tau_e)_j$ — общее время нагружения при температуре $(T_e)_j$; $(t_e)_j$ — время до достижения по кривой изменения $e^T_{mt}$ при температуре $(T_e)_j$ значения $(e^T_{mt})_0$, соответствующего температуре $(T_e)_0$ и времени $(t_e)_0$.

Если значения $e^T_{mt}$ достигают минимума при некотором времени до разрушения $t'$, то при $t > t'$ значение $e^T_{mt}$ принимают равным минимальному.

Значения $(R^T_{mt})_{\text{пр}}$ и $(e^T_{mt})_{\text{пр}}$ используют для расчета $[N_0]$ и $[\sigma_{aF}]$ по формулам п. 5.6.6 Норм и пп. 3, 4 настоящего приложения.

На рис. П7.5 и П7.6 приведены примеры определения $(R^T_{mt})_{\text{пр}}$ и $(e^T_{mt})_{\text{пр}}$. Показан случай двух рабочих температур, приводимых к температуре $(T_\sigma)_0$ при определении $(t_\sigma)_{\text{пр}}$ и температуре, приводящей к наибольшей потере пластичности, при определении $(t_e)_{\text{пр}}$.

9. Если при расчете по пп. 2—8 настоящего приложения условие прочности не удовлетворяется, то с целью уточнения полученного результата расчетное время для рассматриваемого цикла принимается равным наибольшему из $(t_\sigma)_{\text{пр}}$ и $(t_e)_{\text{пр}}$.

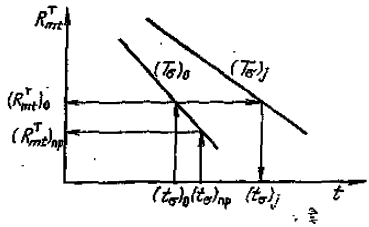



Рис. П7.5. Схема учета нестационарности теплового режима при определении приведенного предела длительной прочности

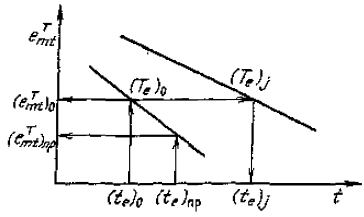



Рис. П7.6. Схема учета нестационарности теплового режима при определении приведенного значения длительной пластичности

Наибольшее время из указанных, например $(t_e)_{np}$, разбивают на интервалы времени, для которых известно ожидаемое эксплуатационное число циклов данного типа, и для моментов времени, отвечающих концу интервалов, выбирают по кривой длительной прочности при температуре $(T_\sigma)_0$ и по кривой изменений $e^T_{mt}$ при температуре $(T_e)_0$ значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ (рис. П7.7).

По формулам пп. 5.6.6 Норм и п. 3, 4 настоящего приложения проводят расчет допускаемого числа циклов $[N_0]$ данного типа, характеризуемого амплитудой напряжений $(\sigma_{aF})$ и асимметрией $r$, используя значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$, отвечающие принятому разбиению длительности нагружения на интервалы.

Суммарное усталостное повреждение с учетом повреждений от других типов циклов должно удовлетворять условию п. 5.6.19 Норм.

10. Если при расчете по пп. 8, 9 настоящего приложения значение $e^T_{mt}$ не изменяется с течением времени и определяется лишь температурой, то время нагружения $t$ следует разделить на отдельные интервалы, соответствующие различным температурам рассматриваемого цикла; в пределах этих интервалов, для которых известно ожидаемое эксплуатационное число циклов, расчет допускаемого числа циклов $[N_0]$ данного типа, характеризуемого амплитудой напряжений $(\sigma_{aF})$ и коэффициентом асимметрии $r$, проводят по формулам п. 5.6.6 Норм и пп. 3, 4 настоящего приложения, используя значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$, отвечающие длительности интервалов и значениям температуры в пределах этих интервалов.

Суммарное усталостное повреждение с учетом повреждений от других типов циклов должно удовлетворять условию п. 5.6.19 Норм.

11. В том случае, когда деформации и напряжения получены из расчета с учетом ползучести, значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ могут быть определены по фактическому уровню длительных статических

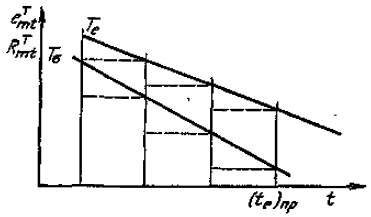



Рис. П7.7. Схема учета зависимости предела длительной прочности и длительной пластичности от времени

повреждений. С этой целью вычисляют длительные статические повреждения $D_t$, накапливаемые при эксплуатационном нагружении. Эксплуатационное нагружение включает все типы циклов при числе повторений, равном ожидаемому за рабочий ресурс детали, и отражает фактическую среднюю длительность нагружения для цикла каждого типа и соответствующие температуры в рассматриваемой зоне детали.

Длительное статическое повреждение

$$D_t = \int_0^t \frac{dt}{t},$$

где $t$ — время до разрушения при длительном статическом нагружении фактическим приведенным местным напряжением при соответствующей температуре в рассматриваемой зоне детали.

При этом учитываются в одинаковой степени повреждения от напряжений растяжения и сжатия, если для данных значений температур и напряжений экспериментально не показано отсутствие повреждений от напряжений сжатия или их меньшее значение по сравнению с растяжением.

Значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ при оценке длительной циклической прочности по п. 5.6.6 Норм и пп. 3, 4 настоящего приложения принимают по кривой длительной прочности при максимальной температуре цикла и по кривой изменения $e^T_{mt}$ в зависимости от времени при температуре цикла нагружения, приводящей к наибольшему снижению пластичности, для длительности нагружения $t^* = D_t t$. Длительное статическое повреждение должно удовлетворять условию $D_t \leqslant 1$. При $D_t = 1$ время $t^*$ равно $t$. При нестационарном нагружении (наличие нескольких типов циклов) должно удовлетворяться условие прочности по п. 5.6.19 Норм.

Уточнение расчета по данному пункту может быть проведено так же, как указано в п. 1.9 настоящего приложения.

12. При использовании сталей с содержанием неметаллических включений выше 3-го балла, определяемого по ГОСТ 1778—70, допускаемое число циклов данного типа следует определять по расчетным кривым усталости пп. 3—5 настоящего приложения при амплитуде напряжения

Таблица П7.1. **Значения**

| Материал | Степень загрязненности, баллы | $K_в$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Лист | | | | | |
| | | 350° С | 400° С | 450° С | 500° С | 550° С | 600° С |
| Легированные стали и сварные соединения | 3,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | — |
| | 3,5 | 0 | 0,04 | 0,07 | 0,11 | 0,14 | — |
| | 4,0 | 0 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | — |
| | 4,5 | 0 | 0,045 | 0,09 | 0,14 | 0,18 | — |
| | 5,0 | 0 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | — |
| Сталь аустенитного класса и сварные соединения | 3,0 | — | — | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3,5 | — | — | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,20 |
| | 4,0 | — | — | 0 | 0,08 | 0,16 | 0,24 |
| | 4,5 | — | — | 0 | 0,09 | 0,18 | 0,28 |
| | 5,0 | — | — | 0 | 0,10 | 0,20 | 0,30 |
| Железоникелевые дисперсионно-твердеющие сплавы и сварные соединения | 3,0 | — | — | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3,5 | — | — | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,20 |
| | 4,0 | — | — | 0 | 0,08 | 0,16 | 0,24 |
| | 4,5 | — | — | 0 | 0,09 | 0,18 | 0,28 |
| | 5,0 | — | — | 0 | 0,10 | 0,20 | 0,30 |

$$(\sigma_{aF})_в = (\sigma_{aF}) + K_{Fв}\Delta\alpha\Delta T E^T,$$

где $(\sigma_{aF})$ — расчетная амплитуда приведенных упругих напряжений от механических и тепловых нагрузок;

$$K_{Fв} = K_в\left(1 - \frac{1}{1{,}25 + 10^{-3}(\sigma_{aF})^2}\right),$$

где $K_в$ — коэффициент влияния неметаллических включений, принимаемый по табл. П7.1; $\Delta\alpha$ — абсолютное значение разности коэффициентов теплового расширения стали и неметаллических включений по табл. П7.1; $\Delta T$ — размах температуры цикла, определяемый по формуле

$$\Delta T = T_{max} - T_{min},$$

где $T_{max}$ и $T_{min}$ — максимальная и минимальная температуры цикла напряжений.

13. При отсутствии данных о содержании неметаллических включений расчет допускаемого числа циклов следует проводить по п. 12, приняв значение коэффициента $K_в$ для 5-го балла.

14. При расчете длительной циклической прочности сварных соединений расчетную амплитуду напряжений определяют как

$$(\sigma_{aF})_s = (\sigma_{aF})_в / \varphi_s,$$

коэффициентов $K_в$ и $\Delta\alpha$

| $K_в$ | | | | | | | | | | | | $\Delta\alpha$, $10^{-6}$ 1/°C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Пруток, трубная заготовка | | | | | | Поковка | | | | | | |
| 350°C | 400° C | 450°C | 500° C | 550° C | 600° C | 350° C | 400° C | 450° C | 500° C | 550° C | 600° C | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | — | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | — | |
| 0 | 0,025 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | — | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | — | |
| 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | — | 0 | 0,02 | 0,045 | 0,065 | 0,09 | — | |
| 0 | 0,035 | 0,07 | 0,11 | 0,14 | — | 0 | 0,025 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | — | 7 |
| 0 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | — | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | — | |
| — | — | 0 | 0 | 0 | 0 | — | — | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| — | — | 0 | 0,05 | 0,11 | 0,16 | — | — | 0 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | |
| — | — | 0 | 0,06 | 0,12 | 0,18 | — | — | 0 | 0,045 | 0,09 | 0,14 | 10 |
| — | — | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,22 | — | — | 0 | 0,05 | 0,11 | 0,16 | |
| — | — | 0 | 0,08 | 0,16 | 0,24 | — | — | 0 | 0,06 | 0,12 | 0,18 | |
| — | — | 0 | 0 | 0 | 0 | — | — | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| — | — | 0 | 0,05 | 0,11 | 0,16 | — | — | 0 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | |
| — | — | 0 | 0,06 | 0,12 | 0,18 | — | — | 0 | 0,045 | 0,09 | 0,14 | 8 |
| — | — | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,22 | — | — | 0 | 0,05 | 0,11 | 0,16 | |
| — | — | 0 | 0,08 | 0,16 | 0,24 | — | — | 0 | 0,06 | 0,12 | 0,18 | |

где $\varphi_s$ — коэффициент снижения длительной циклической прочности сварного соединения, принимаемый по табл. П7.2 в зависимости от максимальной температуры цикла.

15. При расчете циклической прочности элементов конструкций, работающих в контакте с коррозионно-активной средой реакторной чистоты, допускаемое число циклов определяют по расчетной кривой усталости пп. 3—5 настоящего приложения и формулам пп. 5.6.6 и 5.6.7 Норм (при умеренно повышенных температурах, не вызывающих ползучесть) для амплитуды напряжения, определяемой по формуле

$$(\sigma_{aF})_к = \frac{(\sigma_{aF})_в}{\bar{\varphi}_к}$$

или

$$(\sigma_{aF})_{ks} = \frac{(\sigma_{aF})_в}{\bar{\varphi}_{ks}},$$

где $(\sigma_{aF})_в$ — амплитуда условного упругого напряжения, определяемая по пп. 12, 13 настоящего приложения и разд. 5.3 Норм; $\bar{\varphi}_к$ и $\bar{\varphi}_{ks}$ — коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности основного металла и сварного соединения, определяемые в соответствии с требованиями п. 9.6 приложения 2 Норм.

Таблица П7.2. **Значения коэффициентов $\varphi_s$**

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | Температура, °С | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Стали аустенитного класса | Ручная | 48А-1 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,55 |
| | | 48А-2-ВИ | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | ЭА400/10у | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | Аргонодуговая | Св-04Х17Н10М2 | Без термообработки | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,70 | 0,60 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,90 | 0,75 | 0,65 |
| | | Св-02Х17Н10М2-ВИ | Без термообработки | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,70 | 0,65 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,65 | 0,55 |
| | | Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,55 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,60 |
| | | ЭП-198 | Без термообработки | — | — | 0,5 | 0,45 | 0,40 | 0,40 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,5 | 0,50 | 0,45 | 0,45 |
| | Автоматическая | Св-04Х17Н10М2 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Св-02Х17Н10М2-ВИ | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | Электрошлаковая | Св-04Х17Н10М2 | Без термообработки | — | — | 0,7 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,55 |
| | | Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,65 | 0,55 |
| Железо-никелевые дисперсионно-твердеющие сплавы | Аргонодуговая | Св-Х15Н35 | Без термообработки | — | — | 0,7 | 0,65 | 0,55 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | | ЭП-198 | Без термообработки | — | — | 0,5 | 0,45 | 0,40 | 0,40 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,5 | 0,50 | 0,45 | 0,45 |
| Сталь 12Х2М | Ручная | 48Н-10 | Высокий отпуск | 1,0 | 0,80 | 0,7 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |
| | | 48А-1, | Без термообработки | 1,0 | 0,85 | 0,7 | — | — | — |
| | | ЭА-395/9 | Высокий отпуск | 1,0 | 0,80 | 0,6 | — | — | — |
| | | 48А-1, КТИ-7 | Без термообработки | — | — | — | 0,60 | 0,55 | 0,50 |
| | | | Высокий отпуск | — | — | — | 0,50 | 0,40 | 0,30 |
| | Автоматическая под флюсом | Св-04Х2МА | Высокий отпуск | 0,7 | 0,65 | 0,6 | 0,60 | 0,55 | 0,55 |

16. Влияние контакта с натрием или аргоном реакторной чистоты при расчетах длительной циклической прочности не учитывается. Разрешается увеличение допускаемого числа циклов для зон деталей, работающих в контакте с натрием или аргоном, состав которых удовлетворяет требованиям инструкций по эксплуатации за весь эксплуатационный ресурс. За допускаемое число циклов принимается минимальное из двух значений:

число циклов $[N_0]$, определенное по пп. 1—14 настоящего приложения и п. 5.6.6 Норм для амплитуды напряжения $(\sigma_{aF})_в$, умноженное на коэффициент $\varkappa_{Na}$,

$$[N_0]_{Na} = \varkappa_{Na}[N_0],$$

число циклов по расчетной кривой усталости пп. 3—5 настоящего приложения для амплитуды приведенного условного упругого напряжения $(\sigma_{aF})_в$, поделенной на коэффициент $\varphi_{Na}$.

Значения коэффициентов $\varkappa_{Na}$ и $\varphi_{Na}$ приведены в табл. П7.3.

17. При расчете длительной циклической прочности элементов конструкций, работающих в условиях нейтронного облучения, за допускаемое число циклов данного типа принимают минимальное из двух значений:

число циклов $[N_0]_F = [N_0]/\varkappa_F$, где $[N_0]$—число циклов для амплитуды напряжений по пп. 3—16 настоящего приложения или формулам пп. 5.6.6, 5.6.7 Норм (при расчетах для условий умеренно повышенных температур, не вызывающих ползучесть);

число циклов по расчетной кривой усталости или соответствующим уравнениям для амплитуды напряжений, определенной по пп. 3—16 настоящего приложения или пп. 5.6.6, 5.6.7 Норм и поделенной на коэффициент $\varphi_F$.

Значения коэффициентов $\varkappa_F$ и $\varphi_F$ приведены в табл. П7.4.

18. При определении допускаемого числа циклов по расчетным кривым усталости или формулам п. 5.6.6 Норм для деталей с поверхностным диффузионным хромонитридным покрытием амплитуду напряжений $(\sigma_{aF})_п$ вычисляют по формуле

$$(\sigma_{aF})_п = \frac{(\sigma_{aF})_в}{\varphi_п},$$

где $(\sigma_{aF})_в$—амплитуда условных упругих напряжений, определяемая по пп. 2—17 настоящего приложения; $\varphi_п$—коэффициент, принимаемый равным 0,75 для аустенитных сталей и железоникелевых дисперсионно-твердеющих сплавов.

Таблица П7.3. **Значения коэффициентов $\varkappa_{Na}$ и $\varphi_{Na}$**

| Материал | Температура, °С | Коэффициент | Длительность нагружения, ч | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $2\cdot10^5$ |
| Легированные стали | 20—360 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 400 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1 | 1,4 | 1,7 | 2,0 | 2,1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | — | — | — | — |
| | 450 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| | 500 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 5,4 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| | 550 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,0 | 7,5 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,10 | 1,15 | 1,15 | 1,15 |
| Стали аустенитного класса | 20—450 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 500 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| | 550 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 5,4 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| | 600 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,0 | 7,5 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,10 | 1,15 | 1,15 | 1,15 |
| | 20—450 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 500 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,6 |

*Продолжение табл. П7.3*

| Материал | Температура, °С | Коэффициент | Длительность нагружения, ч | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $2 \cdot 10^5$ |
| Железоникелевые дисперсионно-твердеющие сплавы | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | — | — | — | — |
| | 550 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 2,0 | 2,1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | — | — | — | — |
| | 600 | $\varkappa_{Na}$ | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |

Примечание. Для промежуточных температур значения коэффициентов $\varkappa_{Na}$ и $\varphi_{Na}$ получают линейной интерполяцией.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 8*
(рекомендуемое)

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОПРОЧНОСТИ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее приложение к Нормам содержит рекомендуемые методы расчетной и экспериментальной оценки параметров вибраций и вибропрочности оборудования и трубопроводов атомных электростанций.

1.2. Настоящее приложение содержит методы расчетной оценки собственных частот колебаний типовых элементов и экспериментальные методы определения вибронапряженности узлов на моделях и натурных элементах конструкций.

1.3. Для оценки собственных частот колебаний элементов оборудования в настоящем приложении представлен ряд расчетных схем, относящихся к наиболее типичным узлам, таким, как трубопроводы (стержневые системы), пластинки и пологие оболочки.

1.4. Для оценки уровня вибраций и вибронапряженности в случае отсутствия расчетных методик и сведений о параметрах действующих динамических нагрузок предлагаются методы

Таблица П7.4. **Значения коэффициентов $\varkappa_F$ и $\varphi_F$**

| Тип материала | Температура, К (°С) | Коэффициент | $F_N$, м$^{-2}$ ($E \geqslant 0{,}1$ МэВ) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $10^{22}$ | $10^{23}$ | $10^{24}$ | $10^{25}$ | $10^{26}$ | $2\cdot10^{26}$ | $4\cdot10^{26}$ | $6\cdot10^{26}$ | $8\cdot10^{26}$ | $10^{27}$ |
| Легированные стали | 293—623 (20—350) | $\varkappa_F$ | 1,0 | 2,2 | 5,0 | — | — | — | — | — | — | — |
| Сплавы циркония | 293—623 (20—350) | $\varkappa_F$ | 1,0 | 1,4 | 1,9 | 2,6 | 3,6 | — | — | — | — | — |
| Стали аустенитного класса | 748—873 (475—600) | $\varphi_F$ | 1,0 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,7 | 0,67 | 0,65 | 0,63 | 0,6 |
| | 293—873 (20—600) | $\varkappa_F$ | 1,0 | 1,6 | 2,6 | 4,2 | 6,5 | 10 | 17 | 30 | — | — |
| Железоникелевые дисперсионно-твердеющие сплавы | 748—873 (475—600) | $\varphi_F$ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,97 | 0,95 | 0,9 | 0,8 | 0,60 | 0,4 |
| | 293—873 (20—600) | $\varkappa_F$ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 2,0 | 3,6 | — | — |

Примечание. Для промежуточных значений переноса нейтронов коэффициенты $\varkappa_F$ и $\varphi_F$ получают линейной интерполяцией.

экспериментальных исследований, которые проводятся во всех режимах, предусмотренных программой пусконаладочных работ, включая начальный этап эксплуатации установок в стационарных режимах.

1.5. В качестве основного условия вибропрочности элементов конструкций рекомендуется частотная отстройка собственных колебаний от частот детерминированного возбуждения.

На основании экспериментальных данных о вибронапряженном состоянии элементов конструкций предлагается проведение расчета их долговечности.

1.6. В качестве детерминированных частот возбуждения принимают:

основную частоту вращения вала насоса

$$\omega = 2\pi n/60,$$

где $n$ — число оборотов вала, мин$^{-1}$;

частоту электромагнитных сил, вызванную наличием пазов в статоре и роторе приводных электродвигателей насосов,

$$\omega = \frac{2\pi Z_{\text{рот}} n}{60},$$

где $Z_{\text{рот}}$ — число пазов ротора;

частоту гидродинамических сил, определяемую количеством лопаток $Z$ рабочего колеса насоса,

$$\omega = \frac{2\pi Z n}{60};$$

частоту гидродинамических сил, связанную со срывом вихрей при поперечном обтекании теплоносителем элементов конструкций,

$$\omega = \frac{2\pi \mathrm{St} v}{d},$$

где St — безразмерное число Струхаля (например, для одиночного стержня оно принимается равным 0,2, для чисел Рейнольдса $300 \div 5 \cdot 10^5$); $v$ — скорость потока; $d$ — характерный размер обтекаемого элемента в поперечном сечении.

1.7. Возбуждение, связанное с пульсациями давлений и скоростей потока теплоносителя, в частности возникающими при продольном и косом обтекании элементов конструкций, в общем случае рассматривают как процесс нагружения с широкополосным спектром, имеющим случайный характер.

В этом случае вибропрочность оценивается расчетом долговечности элементов по значениям амплитуд переменных напряжений, полученным экспериментально на моделях или натурных конструкциях.

1.8. В настоящем приложении не рассматриваются вопросы, связанные с истиранием и износом элементов, вызываемыми вибрациями.

1.9. В настоящем приложении рассматриваются процессы, параметры которых остаются постоянными в течение заданного ресурса конструкции.

1.10. Для сложных случаев расчета собственных частот колебаний пространственных и разветвленных стержневых систем могут быть использованы приближенные методики и рабочие программы, основанные на энергетическом и других методах.

1.11. При составлении схем (моделей) для расчета собственных частот колебаний конструктивные узлы реакторов, парогенераторов и трубопроводов представляют в виде простых элементов, таких, как стержневые системы, пластинки и пологие оболочки.

1.12. Системы трубопроводов, трубки, сплошные цилиндры, несущие балки произвольного сечения в расчетах рассматривают как балки или стержневые системы с заданными граничными условиями. Тепловые экраны рассматривают как пологие оболочки. Пластины, опорные плиты рассматривают как пластинки.

1.13. Запорно-регулирующую арматуру, установленную на трубопроводах и других конструктивных элементах, рассматривают в расчетах как сосредоточенные массы.

1.14. Расчет собственных колебаний элементов проводят с учетом присоединенной массы теплоносителя, но без учета его движения при условии, что скорость потока $v \leqslant 0{,}3v_{кр}$, где $v_{кр} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{\pi EJ}{m}}$ — критическая скорость потока теплоносителя, при которой наступает потеря устойчивости прямолинейного шарнирно опертого элемента трубопровода с длиной пролета $l$; $m$ — погонная масса теплоносителя; $EJ$ — изгибная жесткость стержня.

Например, при наружном обтекании одиночного элемента присоединенная масса принимается равной массе вытесненной жидкости.

1.15. Расчет собственных частот изгибных колебаний проводят без учета демпфирования систем.

## 2. РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

2.1. Представленные расчетные схемы относятся только к плоским стержневым системам.

2.2. Собственная частота, соответствующая $k$-й форме из-

гибных колебаний стержневых систем с учетом массы теплоносителя, определяется по формуле

$$\Omega_k = \frac{(\alpha l)_k^2}{l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m_c + m_т}}, \qquad (П8.1)$$

где $\Omega_k = 2\pi f_k$; $f_k$ — число колебаний в 1 с; $(\alpha l)_k$ — $k$-й корень частотного уравнения; $l$ — длина участка стержня между опорами; $EJ$ — изгибная жесткость; $m_c$, $m_т$ — погонная масса стержня и учитываемого теплоносителя соответственно.

2.3. Для составления частотного уравнения используют общее выражение собственных форм изгибных колебаний

$$X(x) = C_1 S(\alpha x) + C_2 T(\alpha x) + C_3 U(\alpha x) + C_4 V(\alpha x), \qquad (П8.2)$$

где $X(x)$ — функция координаты $x$, принимающей значение от 0 до $l$; $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$ — произвольные постоянные, определяемые граничными условиями; $S(\alpha x)$, $T(\alpha x)$, $U(\alpha x)$, $V(\alpha x)$ — табулированные функции Крылова, определяемые выражениями

$$\left.\begin{aligned} S(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\alpha x + \cos\alpha x);\\ T(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh}\alpha x + \sin\alpha x);\\ U(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\alpha x - \cos\alpha x);\\ V(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh}\alpha x - \sin\alpha x). \end{aligned}\right\} \qquad (П8.3)$$

В качестве граничных условий в опорных сечениях стержня принимают значения:

прогиба $X(0, l)$;

угла поворота $X'(0, l)$;

момента $EJX''(0, l)$;

перерезывающей силы $EJX'''(0, l)$, где $X'(0, l)$; $X''(0, l)$; $X'''(0, l)$ — 1-я, 2-я и 3-я производные уравнения (П8.2).

Из полученной системы четырех уравнений с учетом (П8.3) составляется определитель из коэффициентов при постоянных $C_1$, $C_2$, $C_3$ и $C_4$ и приравнивается нулю.

Раскрытие определителя дает частотное уравнение, корнями которого является множество значений $(\alpha l)_k$. Для оценочных расчетов ограничиваются нахождением первых двух-трех корней $(\alpha l)$, соответствующих основным формам колебаний. Число подлежащих учету корней частотного уравнения определяется шириной спектра нагрузок, способных вызвать сколько-нибудь заметные вибрации.

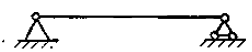
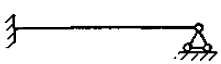
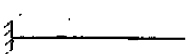
2.4. Для типовых расчетных схем стержневых систем и балок с различными условиями закрепления в табл. П8.1 — П8.3 приведены значения корней частотных уравнений, соответствующих основным формам колебаний.

В табл. П8.1 даны значения корней частотных уравнений однопролетных балок при различных вариантах закрепления. Таблицы П8.2 и П8.3 содержат значения корней частотного уравнения Г-образных участков стержней в зависимости от угла гиба $\psi$ для определения основной собственной частоты колебаний в плоскости, перпендикулярной плоскости гиба.

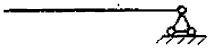
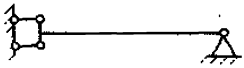
2.5. В расчетах стержневых систем со ступенчатым изменением сечений при наличии промежуточных опор и дополнительных масс при составлении частотных уравнений учитывают условия сопряжения смежных участков.

Аналитические условия сопряжения записывают в виде: равенства перемещений $X_- = X_+$;

Таблица П8.1. **Значения $\alpha l$ для стержней с различными условиями крепления**

| Схема стержня | Номер формы колебаний | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|  Оперт — оперт | 3,142 | 6,283 | 9,425 | 12,566 |
|  Защемлен — защемлен | 4,730 | 7,853 | 10,996 | 14,137 |
|  Защемлен — оперт | 3,927 | 7,069 | 10,210 | 13,352 |
|  Защемлен — свободен | 1,875 | 4,694 | 7,855 | 10,996 |
|  Свободен — свободен | 0 | 4,730 | 7,853 | 10,996 |

*Продолжение табл. П8.1*

| Схема стержня | Номер формы колебаний | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|  Свободен — оперт | 0 | 3,927 | 7,069 | 10.210 |
|  Левый не может поворачиваться, в остальном свободен, правый оперт | 1,571 | 4,712 | 7,854 | 10,996 |
|  Левый и правый не могут поворачиваться, в остальном свободны | 3,142 | 6,283 | 9,425 | 12,566 |
|  Левый защемлен, правый не может поворачиваться, в остальном свободен | 2,365 | 5,498 | 8,639 | 11,781 |
|  Левый свободен, правый не может поворачиваться, в остальном свободен | 2,365 | 5,498 | 8,639 | 11,781 |

углов поворота $X'_- = X'_+$;
моментов $(EJX'')_- = (EJX'')_+$;
перерезывающих сил с учетом реакций опор и сосредоточенных массовых нагрузок $(EJX''')_- = (EJX''')_+ \pm R$.

В табл. П8.4 приведены графики первых корней частотных уравнений для типовых стержней с промежуточными опорами и сосредоточенными массами.

## 3. РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ИЗОТРОПНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН

3.1. Для пластин, опертых по контуру, собственную частоту колебаний $\Omega$ определяют по формуле

Таблица П8.2. **Значения $\alpha l$ Г-образных стержней с защемленными концами**

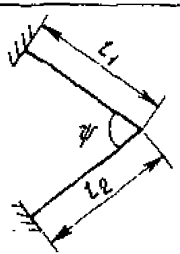
| Схема стержня | $\psi$, град | $l_1/l=l_1/(l_1+l_2)$ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |
|  | 0 | 4,730 | 5,030 | 5,317 | 5,727 | 5,786 | 5,193 | 4,570 | 4,118 | 3,843 | 3,750 |
| | 30 | 4,730 | 4,987 | 5,244 | 5,680 | 5,486 | 5,004 | 4,473 | 4,091 | 3,869 | 3,781 |
| | 60 | 4,730 | 4,896 | 5,060 | 5,165 | 5,074 | 4,737 | 4,375 | 4,100 | 3,933 | 3,877 |
| | 90 | 4,730 | 4,810 | 4,903 | 4,939 | 4,847 | 4,635 | 4,399 | 4,209 | 4,091 | 4,046 |
| | 120 | 4,730 | 4,756 | 4,801 | 4,809 | 4,758 | 4,648 | 4,518 | 4,422 | 4,339 | 4,306 |
| | 150 | 4,730 | 4,733 | 4,747 | 4,748 | 4,732 | 4,702 | 4,662 | 4,626 | 4,600 | 4,591 |
| | 180 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 |

Таблица П8.3. **Значения $\alpha l$ Г-образных стержней с односторонним защемлением ($l=l_1+l_2$)**

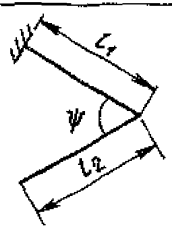
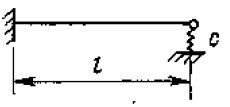
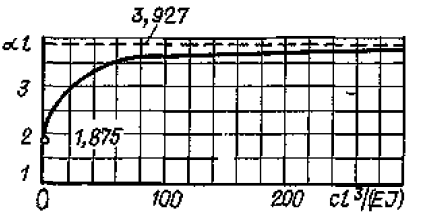
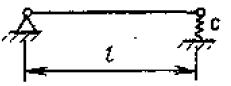
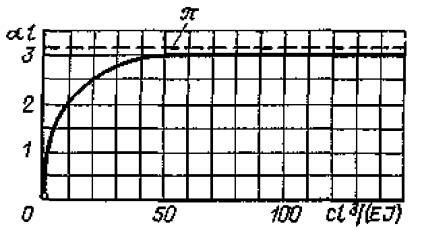
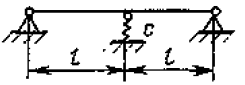
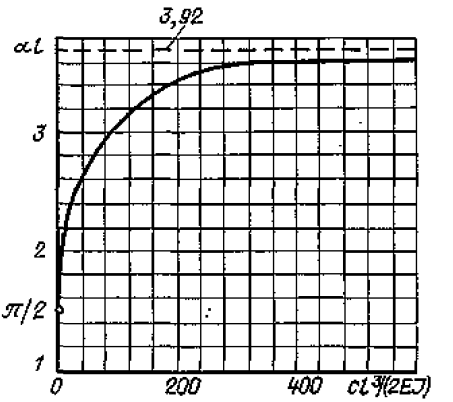
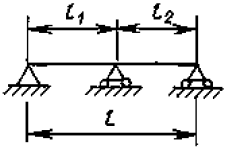
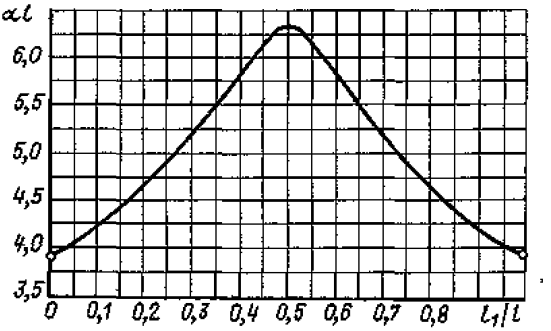
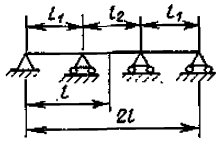
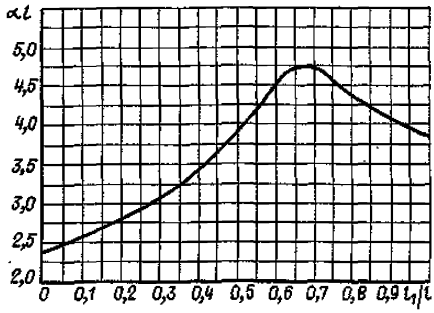
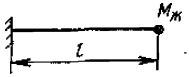
| Схема стержня | $\psi$, град | $l_1/l_2$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 2/8 | 4/6 | 5/5 | 6/4 | 8/2 | $\infty$ |
|  | 0 | 1,875 | 2,053 | 2,623 | $\pi$ | 2,623 | 2,053 | 1,875 |
| | $\pi/3$ | 1,875 | 1,946 | 2,226 | 2,362 | 2,316 | 2,005 | 1,875 |
| | $\pi/2$ | 1,875 | 1,890 | 2,038 | 2,102 | 2,104 | 1,959 | 1,875 |
| | $2\pi/3$ | 1,875 | 1,868 | 1,929 | 1,962 | 1,967 | 1,915 | 1,875 |
| | $\pi$ | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 |

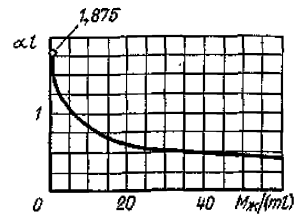
Таблица П8.4. **Значения $\alpha l$ стержневых систем с промежуточными опорами и сосредоточенными массами**

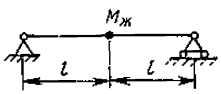
| Схема стержня | График |
|---|---|
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

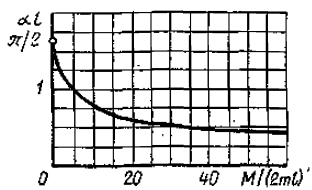


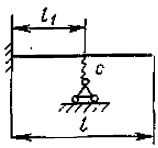



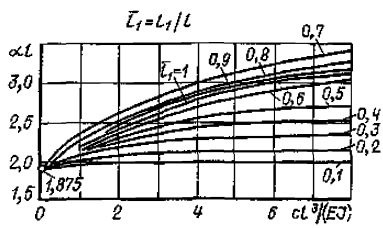




$$\Omega=\pi^2\left(\frac{m_1^2}{a_1^2}+\frac{m_2^2}{a_2^2}\right)\left(\frac{D}{\rho h}\right)^{1/2},$$

где $m_1$, $m_2=1, 2, 3, \ldots$ — числа полуволн соответствующих форм собственных колебаний; $a_1$, $a_2$ — размеры сторон; $D=Eh^3/[12(1-\mu^2)]$ — цилиндрическая жесткость; $h$ — толщина пластины; $\rho$ — плотность материала; $\mu$ — коэффициент Пуассона.

Таблица П8.5. **Значения α для различных граничных условий**

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Оперт-защемлен | $a_2/a_1$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| | α | 6,85 | 5,92 | 5,51 | 5,41 | 5,50 | 5,74 |
| Оперт-свободен | $a_2/a_1$ | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 2,0 | 3,0 | 5,0 |
| | α | 4,40 | 2,15 | 1,14 | 0,70 | 0,56 | 0,51 |
| Защемлен-защемлен | $a_2/a_1$ | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| | α | 9,44 | 7,69 | 7,05 | 7,00 | 7,29 | 7,83 |
| Защемлен-свободен | $a_2/a_1$ | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | 2,2 |
| | α | 2,70 | 1,70 | 1,41 | 1,33 | 1,36 | 1,45 |

3.2. Для пластин, опертых по двум противоположным сторонам $x_1=0$; $a_1$, при различных условиях на сторонах $x_2=0$; $a_2$ собственную частоту определяют по формуле

$$\Omega=\frac{\pi^2 a_2^2}{a_1^2}\left(\frac{\alpha D}{\rho h}\right)^{1/2},$$

где α — безразмерный параметр частоты, значения которого для различных граничных условий на сторонах $x_2=0$; $a_2$, приведены в табл. П8.5.

3.3. Для пластин, защемленных по контуру, собственную частоту колебаний определяют по формуле

$$\Omega=\frac{\alpha}{a_1^2}\left(\frac{D}{\rho h}\right)^{1/2},$$

где α — безразмерный параметр частоты, значения которого для различных отношений сторон $a_1/a_2$ при различных числах полуволн соответствующих форм колебаний $m_1$ и $m_2$ приведены в табл. П8.6.

## 4. РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПОЛОГИХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

4.1. Для свободно опертых пологих оболочек с положительной кривизной и постоянными радиусами кривизны $R_1$ и $R_2$ собственные частоты колебаний определяют по формуле

$$\Omega_{nm}=\alpha_{nm}\sqrt{E/\rho},$$

где $\alpha_{nm}$ — параметр, определяемый выражением

Таблица П8.6. **Значения параметра $\alpha$ для защемленной по контуру прямоугольной пластины**

| $m_2$ | $a_1/a_2$ | $m_1$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 1 | 35,999 | 73,405 | 131,902 | 210,526 | 309,038 | 428 |
| | 1,5 | 27,012 | 65,5 | 126 | 206 | 303 | 422 |
| | 2 | 24,58 | 64,1 | 124 | 204 | 302 | 421 |
| 2 | 1 | 73,405 | 108,237 | 165,023 | 242,66 | 340,59 | 458,27 |
| | 1,5 | 41,715 | 79,81 | 138,64 | 218 | 316,11 | 436 |
| | 2 | 31,833 | 71,08 | 130,35 | 210 | 308,12 | 427 |
| 3 | 1 | 131,902 | 165,023 | 220,06 | 296,35 | 393,36 | 509,9 |
| | 1,5 | 66,533 | 103 | 161,234 | 241 | 339 | 457 |
| | 2 | 44,779 | 83,2 | 142,38 | 221 | 320,12 | 439 |
| 4 | 1 | 210,526 | 242,66 | 296,35 | 371,38 | 467,29 | 593,8 |
| | 1,5 | 100,81 | 136,096 | 193,24 | 271,17 | 369,34 | 488 |
| | 2 | 63,34 | 100,80 | 159,49 | 238,35 | 337,08 | 456 |
| 5 | 1 | 309,038 | 340,59 | 393,36 | 467,29 | 562,18 | 676 |
| | 1,5 | 144,21 | 178 | 234,65 | 312 | 409 | 529 |
| | 2 | 87,26 | 124,2 | 181,79 | 261 | 358 | 478 |
| 6 | 1 | 428 | 458,27 | 509,9 | 583,83 | 676 | 792,5 |
| | 1,5 | 195 | 230,04 | 285,4 | 361,90 | 456 | 576,6 |
| | 2 | 117 | 151,91 | 209,6 | 287,54 | 382 | 504,3 |

$$\omega_{mn}^2=\frac{\delta^2}{12(1-\mu^2)}\left[\left(\frac{m\pi}{a_1}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{a_2}\right)^2\right]^2+\frac{\left[\frac{1}{R_1}\left(\frac{m\pi}{a_1}\right)^2+\frac{1}{R_2}\left(\frac{n\pi}{a_2}\right)^2\right]^2}{\left[\left(\frac{m\pi}{a_1}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{a_2}\right)^2\right]^2},$$

где $\delta$ — толщина оболочки; $m$, $n$ — число полуволн в направлениях $a_1$, $a_2$ для соответствующих форм колебаний; $a_1$, $a_2$ — расстояния между краями оболочки вдоль линий с радиусами кривизны $R_1$ и $R_2$.

Для цилиндрической оболочки следует положить $R_1=\infty$; $R_2=R$; для сферической оболочки $R_1=R_2=R$.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ

### 5.1. ЦЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1.1. Экспериментальные исследования параметров вибраций (вибродеформаций и вибронапряжений, перемещений, скоростей, ускорений и частотных спектров) элементов конструкций проводят в тех случаях, когда на стадии предварительных расчетов отсутствуют сведения о характеристиках действующих нагрузок и их спектров.

5.1.2. Экспериментальные исследования вибраций проводят с целью:

определения уровня вибраций оборудования, для которого их предельно допустимые значения оговорены технической документацией;

определения динамических характеристик элементов конструкций;

определения параметров вибраций конструкций для последующей оценки их вибропрочности;

накопления данных, необходимых для разработки и совершенствования методов расчета и проектирования конструкций с учетом воздействия вибрационных нагрузок.

### 5.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.2.1. Для определения параметров вибраций и вибронапряженности конструкций применяют методы виброметрирования и динамического тензометрирования.

5.2.2. Выбор метода исследований должен проводиться с учетом целей и условий проведения исследований.

### 5.3. ОБЪЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.3.1. Экспериментальное определение пиковых, средних или среднеквадратических значений параметров вибраций можно

проводить на натурных конструкциях или на их моделях, выполненных в соответствии с требованиями условий подобия по гидродинамике и динамическим свойствам конструкций.

5.3.2. Экспериментальные исследования на моделях и натурных конструкциях при решении задач пп. 5.1.1. и 5.1.2 настоящего приложения могут проводиться на всех стадиях проектирования и отработки конструкций.

5.3.3. При выборе модели исследования следует руководствоваться рекомендациями разд. 5.3 и 5.4 приложения 3 Норм.

### 5.4. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.4.1. В качестве исходной информации при постановке эксперимента должны быть использованы данные по режимам работы конструкций, характеристикам оборудования и параметрам теплоносителя.

5.4.2. На основании исходной информации по объекту испытаний (см. п. 5.4.1 настоящего приложения) проводят предварительный анализ вибронапряженности конструкции с целью определения зон повышенной напряженности и сечений с максимальными виброперемещениями.

5.4.3. В качестве контрольных точек измерений в соответствии с п. 5.4.2 настоящего приложения выбирают:

зоны соединений различных конструктивных элементов;

зоны гибов трубопроводов;

места крепления (заделок) элементов конструкций;

сечения с возможными максимальными прогибами при колебаниях по низшим формам.

### 5.5. ДИНАМИЧЕСКОЕ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ

5.5.1. При исследованиях вибронапряженности элементов конструкций методом динамического тензометрирования следует руководствоваться рекомендациями пп. 5.5.1 и 5.5.2 приложения 3 Норм.

5.5.2. Для записи быстропротекающих процессов применяют универсальные записывающие многоканальные светолучевые осциллографы и многоканальные технические магнитографы, работающие в широком диапазоне частот.

### 5.6. ВИБРОМЕТРИРОВАНИЕ

5.6.1. В качестве первичных преобразователей механических колебаний могут быть использованы приборы, в основу которых заложены такие принципы преобразования, как омический, емкостный, индуктивный, индукционный, оптический, пьезоэлектрический и т. д.

Для практического использования применяют преобразователи и вторичную измерительную аппаратуру, имеющие нижнюю граничную частоту начиная с долей или единиц герц.

5.6.2. Для записи вибрационных процессов применяют приборы, указанные в п. 5.5.2 настоящего приложения. В качестве регистрирующих устройств, необходимых для накопления и хранения информации, могут служить многоканальные технические магнитографы, позволяющие при анализе процессов многократно воспроизводить требуемые реализации.

5.6.3. Для частотного анализа применяют спектроанализаторы с записью уровней вибрационных процессов на соответствующих самописцах.

5.6.4. Терминология и определения основных понятий в области виброизмерительных приборов должны соответствовать ГОСТ 16819—71.

5.6.5. Выбор виброизмерительных приборов для проведения экспериментальных исследований должен удовлетворять требованиям ГОСТ 25865—83.

5.6.6. Методы и средства поверки виброизмерительных устройств с пьезоэлектрическими измерительными вибропреобразователями, работающими в диапазоне частот 1—12 000 Гц, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 8.246—77.

5.6.7. Проверка виброизмерительных приборов должна проводиться не реже чем 1 раз в год.

### 5.7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

5.7.1. При расшифровке осциллографических записей и спектрограмм определяют действительные значения параметров вибраций и основные частоты энергетического спектра вибраций, позволяющие установить характер колебательного процесса.

5.7.2. Обработку записей вибрационных процессов, имеющих случайный характер, проводят с привлечением методов спектрального и корреляционного анализа.

## 6. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

6.1. Одним из критериев обеспечения вибропрочности является условие отстройки собственных частот колебаний элементов конструкций от дискретных частот детерминированного возбуждения, определяемых по п. 1.6 настоящего приложения.

Условие отстройки собственных частот для первых трех форм колебаний элементов конструкций в каждой плоскости записывается в виде

$$\Omega_i/\omega \geqslant 1{,}3 \quad \text{или} \quad \Omega_i/\omega \leqslant 0{,}7,$$

где $\Omega_i$ — низшая собственная частота колебаний ($i=1, 2, 3$); $\omega$ — частота возбуждения.

Для более высоких форм колебаний при наличии высокочастотных возбудителей вибраций условие отстройки имеет следующий вид:

$$\Omega_i/\omega \geqslant 1{,}1 \quad \text{или} \quad \Omega_i/\omega \leqslant 0{,}9 \quad (i=4, 5, \ldots).$$

В случае невозможности выполнения требований данных условий необходимо показать, что уровни вибраций элементов конструкции находятся в допустимых пределах.

6.2. Для исключения возможных соударений однотипных элементов конструкций, объединенных в группы (пакеты), принимают условие, удовлетворяющее неравенству

$$A < (t-d)/2,$$

где $A$ — максимальная амплитуда виброперемещений элемента; $t$ — шаг элементов с наибольшим размером $d$ в поперечном сечении.

Для произвольных элементов, расположенных с зазором $\Delta$, данное условие принимают в виде

$$|A_1| + |A_2| < \Delta,$$

где $A_1$ и $A_2$ — амплитуды виброперемещений соответствующих элементов.

Для колебательных процессов, имеющих случайный характер, значения амплитуд $A$, $A_1$ и $A_2$ устанавливаются с учетом их рассеивания с заданной вероятностью; например, для нормального закона распределения при вероятности 0,997 значения амплитуд принимаются равными $\bar{A}+3\sigma$, где $\sigma$ — среднеквадратическое отклонение от среднего значения $\bar{A}$.

6.3. Расчетную оценку долговечности элементов конструкций в случае наложения на основной цикл нагружения вибронапряжений проводят по методике, изложенной в п. 5.6 Норм.

При расчете повреждения $a_2$ в случае узкополосного спектра используются максимальная среднеквадратическая амплитуда высокочастотных местных напряжений и соответствующая ей частота.

При широкополосном спектре значение $a_2$ определяется как сумма повреждений для тех амплитуд местных напряжений и соответствующих им частот, которые вызывают повреждения более 10% максимального повреждения на одном из сочетаний амплитуды — частоты из всего спектра. Асимметрия цикла определяется с учетом среднего напряжения, принимаемого равным постоянному местному напряжению от механических и тепловых нагрузок с включением остаточных напряжений растяжения.

Повреждение $a_3^*$ определяется с учетом трех максимальных амплитуд высокочастотных напряжений без учета концентрации $<\sigma_a>_1$, $<\sigma_a>_2$, $<\sigma_a>_3$ и соответствующих им частот $f_1, f_2, f_3$ для каждого типа цикла переменного напряжения на переходных режимах. Для низкочастотного цикла $i$-го типа по формуле (5.44) п. 5.6.20 Норм определяются значения $\varkappa_{1i}$, $\varkappa_{2i}$, $\varkappa_{3i}$, а при определении $(a_3^*)$, рассчитываемого по формуле (5.43) Норм, коэффициент $\varkappa_i$ определяется по формуле

$$\varkappa_i = \sqrt{(\varkappa_1)_i^2 + (\varkappa_2)_i^2 + (\varkappa_3)_i^2}.$$

Доля повреждения $a_3^{**}$ определяется по формуле (5.39) Норм с учетом максимальной амплитуды высокочастотного напряжения при прохождении резонанса. Число циклов определяется с учетом времени эксплуатации в условиях резонанса. Асимметрия цикла высокочастотного нагружения определяется местным напряжением от механических и тепловых нагрузок при эксплуатации с учетом остаточных напряжений растяжения для середины интервала времени, соответствующего резонансу.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 9*
(рекомендуемое)

## РАСЧЕТ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 1. ОБОБЩЕННЫЕ СПЕКТРЫ ОТВЕТА

Обобщенные спектры ответа, приведенные на рис. П9.1 и П9.2, соответствуют сейсмичности площадки 9 баллов, относительному демпфированию $K=0{,}02$ и рекомендуются для оборудования и трубопроводов в составе унифицированных АЭС с ВВЭР-1000. Для сейсмичности ниже 9 баллов значения ускорений, полученные по рис. П9.1 и П9.2, умножают на коэффициент пересчета из табл. П9.1.

Таблица П9.1. **Значения коэффициента пересчета**

| Сейсмичность площадки | 8 | 7 | 6 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Коэффициент пересчета | 0,5 | 0,25 | 0,12 | 0,06 |

Значения ускорений для промежуточных отметок оборудования или трубопроводов могут быть определены интерполяцией.

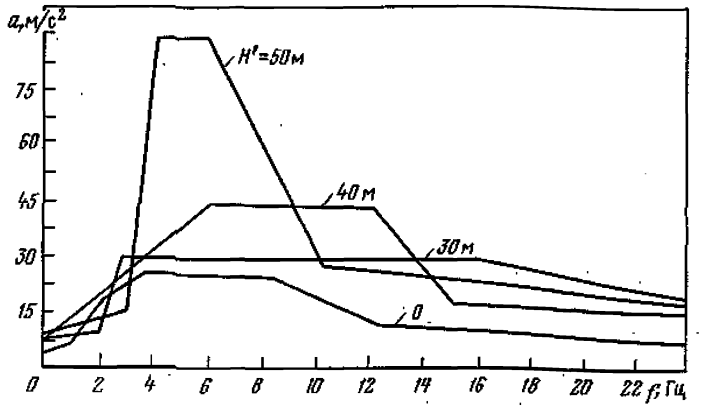



Рис. П9.1. Обобщенные спектры ответа горизонтальных колебаний при $K=0{,}02$ и сейсмичности площадки 9 баллов

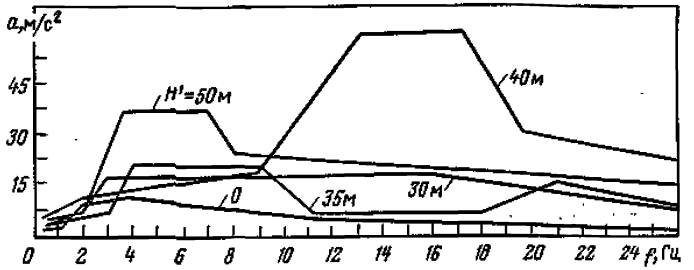



Рис. П9.2. Обобщенные спектра ответа вертикальных колебаний при $K=0{,}02$ и сейсмичности площадки 9 баллов

## 2. УНИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

### 2.1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИНДЕКСЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

$NLC$ — нелинейная система
$LC$ — линейная система
$DAM$ — метод динамического анализа
$LCM$ — линейно-спектральный метод
$m_{ii}$ — коэффициент инерции $i$-й парциальной системы (диагональный элемент матрицы $[M]$)
$[C]$ — матрица жесткости
$[M]$ — матрица масс (инерции)

$\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}$ — векторы относительных перемещений, скоростей и ускорений соответственно

$N$ — число степеней свободы

$[B]$ — матрица демпфирования

$\{R\}$ — вектор реактивных сил от «нелинейных связей»

$\{\cos\alpha\}$ — вектор направляющих косинусов

$\ddot{\psi}(t)$ — ускорение основания расчетной модели (акселерограмма)

$\{F\}$ — результирующий вектор внешних нагрузок

$f$ — собственная частота, Гц

$a$ — ускорение, м/с$^2$

$H'$ — отметки оборудования или трубопровода, м

$\omega$ — круговая собственная частота колебаний оборудования или трубопровода в воздушной среде, рад/с

$\tilde{\omega}$ — круговая собственная частота колебаний оборудования или трубопровода в жидкой среде, рад/с

$C$ — коэффициент жесткости, Н/м

$C_Q$ — коэффициент сдвига

$M$ — масса части оборудования или трубопровода

$\tilde{M}$ — присоединенная масса жидкости, кг

$\tilde{M}_{red}$ — приведенная масса части оборудования или трубопровода с учетом присоединенной массы жидкости, кг

$M_1$ — погонная масса части оборудования или трубопровода, кг/м

$M_0$ — масса жидкости, вытесненной погруженной в нее частью оборудования или трубопровода, кг

$g$ — 9,81 м/с$^2$ — ускорение свободного падения

$G$ — вес, Н

$q$ — сила, Н

$m$ — момент силы, Н·м

$E$ — модуль упругости, Н/м$^2$

$\mu$ — коэффициент Пуассона

$\xi$ — коэффициент присоединенной массы

$M'$ — функция от координат части оборудования, представляющая распределение ее массы, кг

$A$ — функция от координат части оборудования, определяющая форму рассматриваемого колебания и представляющая отношение перемещений точек части оборудования к перемещению точки приведения, которое принимается равным единице

$\delta$ — перемещение, м

$A_s$ — площадь поперечного сечения, м$^2$

$l$ — длина элемента конструкции, м

$d$ — диаметр, м

$t$ — шаг отверстий, м

$s$ — толщина, м

$J$ — момент инерции поперечного сечения, м$^4$

$J_0$ — момент инерции вращения массы, кг·м$^2$

$i$ — радиус инерции, м

$z$ — число элементов конструкции

$D=\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость, Н·м

Индексы

*i* — для параметров, относящихся к *i*-й части оборудования
*st* — для параметров, относящихся к статической нагрузке (от собственного веса)
*kr* — для критического значения при расчете на устойчивость
*red* — для параметров, относящихся к точке приведения
*l* — для параметров, относящихся к лапам
*w* — для параметров, относящихся к болтам
*a* — наружный

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Опорная связь* (*опора*) — конструкция, соединяющая оборудование или трубопровод с точкой крепления (анкерный болт, крепежная лапа, опорный фланец, амортизатор и т. п.).

*Неопорная связь* — конструкция, соединяющая агрегаты оборудования между собой (патрубок, сильфон, трубопроводы и т. п.).

*Амортизатор* — механизм или гидромеханизм, соединяющий оборудование с точкой его крепления в целях повышения прочности этого оборудования при сейсмических нагрузках. Конструкция амортизатора должна обеспечивать малую жесткость его при температурных перемещениях оборудования и большую жесткость при сейсмических нагрузках.

*Жидкость*, в которой находится колеблющееся тело, считают *безграничной*, если размер сосуда в направлении колебания тела более чем в 5 раз превышает максимальный размер тела в этом направлении.

### 2.2. ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА

Метод расчета выбирается в соответствии с табл. П9.2. Трубопроводы допускается рассматривать как линейные системы.

Исходными данными по сейсмическому воздействию являются акселерограммы или спектры ответа.

Таблица П9.2. **Рекомендации по выбору метода расчета и исходных данных сейсмического воздействия**

| Тип расчетной модели | Метод расчета | Исходные данные по воздействию |
|---|---|---|
| *LC* | *DAM или LCM* | Акселерограммы или спектры ответа |
| *NLC* | *DAM* | Акселерограммы |

### 2.3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

2.3.1. Принципы построения и требования к механической модели оборудования.

Для проведения расчетов элементов оборудования на прочность от сейсмических воздействий составляют механическую модель оборудования, состоящую из масс, соединенных между собой и с точками крепления связями. Элементы оборудования, имеющие малую массу (узел крепления, амортизатор и т. п.), вносят в модель только как связь, обладающую определенной жесткостью. Если оборудование состоит из отдельных агрегатов, жестко закрепленных и имеющих неопорные связи, эти связи в дальнейших расчетах не учитывают.

Расчетная механическая модель оборудования или трубопроводов должна отражать основные динамические свойства рассматриваемой конструкции, удовлетворять объему необходимой расчетной проверки и возможностям программ расчета на ЭВМ и (или) выбранным методам расчета.

2.3.2. Расчет основных параметров механической модели оборудования.

2.3.2.1. Для части оборудования, которая может быть схематизирована в виде сосредоточенной массы со связью, массу и коэффициент жесткости определяют на основе чертежей. Для вычисления коэффициента жесткости используют методы сопротивления материалов.

Круговую собственную частоту определяют по формуле

$$\omega_i = \sqrt{C_i / M_i}.$$

2.3.2.2. Для определения массы, коэффициента жесткости и круговой собственной частоты деталей и сборочных единиц с распределенными параметрами используют метод приведения, который заключается в следующем:

1) задают определенную кривую прогиба, которая может иметь место при колебаниях (в первом приближении — это кривая статического прогиба от весовых нагрузок);

2) выбирают точку приведения (точка может быть выбрана произвольно, но должно выполняться условие: при колебаниях конструкции перемещение точки приведения отлично от нуля);

3) вычисляют для принятой точки приведения приведенную массу $M_{red}$;

4) определяют круговую собственную частоту по формуле

$$\omega_i = \sqrt{C_{red} / M_{red}}.$$

В общем случае для части оборудования с распределенными параметрами

$$M_{red} = \int\int\int M' A^2 \, dx \, dy \, dz;$$

$$C_{red} = 2\Pi\delta^{st}_{red},$$

где $\Pi\delta^{st}_{red} = 1$ — потенциальная энергия части оборудования при перемещении точки приведения, равном единице. Значения $M_{red}$ и $C_{red}$ могут быть вычислены также по формулам

$$M_{red}=\frac{\sum G_i(\delta_i^{st})^2}{g(\delta_{red}^{st})^2};$$

$$C_{red}=\frac{\sum G_i\delta_i^{st}}{(\delta_{red}^{st})^2}.$$

Приведенные коэффициенты жесткости могут быть определены методами сопротивления материалов. Причем для деталей малой длины ($s/l\geqslant 0{,}3$) следует учитывать влияние сдвига, умножая приведенный коэффициент жесткости на коэффициент сдвига $C_Q$, определяемый в зависимости от формы детали.

2.3.2.3. Если для части оборудования с постоянным поперечным сечением (постоянная погонная масса $M_1$) в качестве кривой прогиба выбрана кривая статического прогиба от сосредоточенной силы $F$, приложенной в точке приведения, то

$$M_{red}=M'l\int_0^1 A_p^2(\vartheta)\,d\vartheta,$$

где $A_p(\vartheta)$ — относительная кривая статического прогиба от силы $F$; $\vartheta$ — относительная координата.

В этом случае приведенный коэффициент жесткости равен силе (или моменту), вызывающей в направлении действия перемещение точки приведения, равное единице.

2.3.2.4. Приведенную массу части оборудования, находящегося в жидкой среде, определяют с учетом присоединенной массы жидкости по формуле

$$\tilde{M}_{red}=M_{red}+\tilde{M}.$$

Присоединенную массу жидкости вычисляют по формуле

$$\tilde{M}=\xi M_0.$$

2.3.2.5. Для частей оборудования, находящихся в безграничной жидкости, $\xi$ следует принимать в соответствии с табл. П9.3.

2.3.2.6. Коэффициент $\xi$ для цилиндрических элементов, находящихся в ограниченных объемах воды, можно определить по рис. П9.5.

2.3.2.7. Погонную массу стержня $\tilde{M}_1$ с учетом присоединенной массы вычисляют по формуле

$$\tilde{M}_1=M_1+M_2,$$

где $M_2$ — присоединенная погонная масса жидкости, определяемая по формуле $M_2=\xi M_{01}$, $M_{01}$ — масса жидкости, вытесненная стержнем единичной длины.

2.3.2.8. Для сосуда или стержня, полностью заполненного жидкостью, а также для вертикальных цилиндрических сосудов с отношением высоты жидкости к радиусу сосуда больше четырех присоединенная масса жидкости равна массе жидкости.

Таблица П9.3. **Значения коэффициента ξ**

| Форма части оборудования | Направление перемещения при колебаниях | ξ |
|---|---|---|
| Длинный цилиндр ($l \geqslant 8d$) | Перпендикулярно продольной оси | 1,0 |
| Короткий цилиндр ($l < 8d$) | То же | По рис. П9.3 |
| Пакет цилиндрических стержней | » | По рис. П9.4 |
| Шар | Любое | 0,5 |

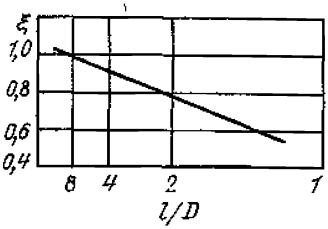



Рис. П9.3. Коэффициент присоединенной массы для одиночных цилиндрических стержней при колебаниях в безграничном объеме жидкости

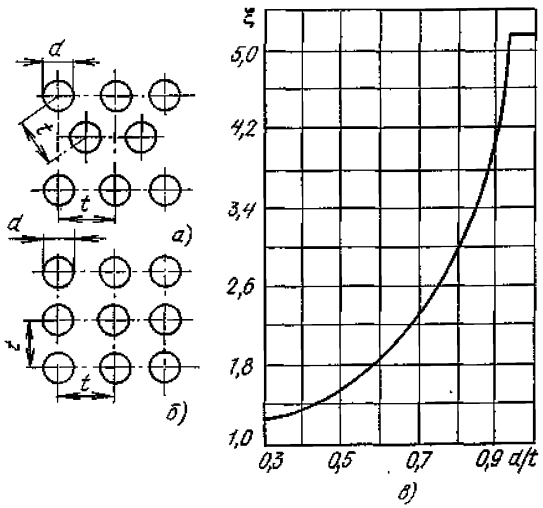



Рис. П9.4. Коэффициент присоединенной массы для пакетов стержней: *а* — расположение стержней по треугольной сетке; *б* — расположение стержней по квадратной сетке; *в* — коэффициент ξ

2.3.2.9. Круговую собственную частоту части оборудования, погруженной в жидкость, определяют по формуле

$$\tilde{\omega}_i = \sqrt{\frac{C_{red}}{M_{red}}}$$

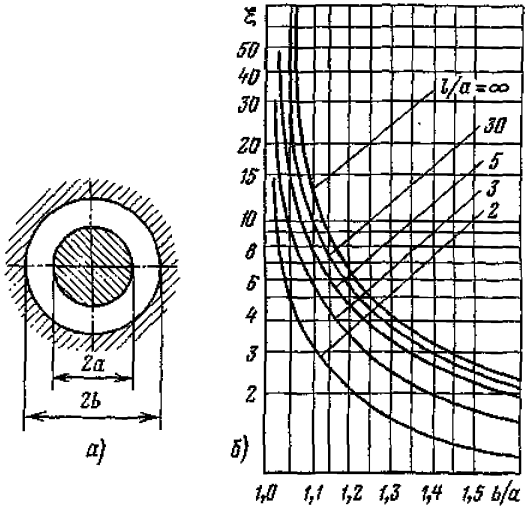



Рис. П9.5. Схема (*а*) и зависимость коэффициента присоединенной массы от *b/a* для одиночных стержней при колебаниях в ограниченном объеме жидкости (*б*). При $l/a<2$ во всех случаях следует принимать $\xi=1{,}0$

или

$$\tilde{\omega}_i=\frac{\omega_i}{\sqrt{1+\tilde{M}/M_{red}}}.$$

2.3.2.10. Частоту свободных колебаний части оборудования, которая может быть схематизирована в виде прямолинейной однопролетной балки постоянного поперечного сечения, определяют по формуле

$$\omega_i=\frac{x}{l^2}\sqrt{\frac{E\mathcal{J}}{M_1}},$$

где $x$ — коэффициент, определяемый в соответствии с табл. П9.4.

Для этих же частей оборудования в табл. П9.4 приведены значения приведенных жесткостей и приведенных масс.

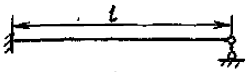
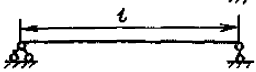
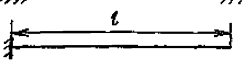
### 2.4. РАСЧЕТ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ

2.4.1. Выбор расчетных схем.

2.4.1.1. Расчетные схемы основных типовых частей оборудования приведены на рис. П9.6 и П9.7.

2.4.1.2. Выемную часть реактора, состоящую, например, из выемного экрана, в нижней своей части соединенного с плитой,

Таблица П9.4. **Значения приведенных жесткостей и масс**

| Расчетная схема | $x$ | $C_{red}$ | $M_{red}$ |
|---|---|---|---|
|  | 22,4 | $200\frac{E_c J}{l^3}$ | $0{,}4M_1 l$ |
|  | 15,4 | $102\frac{E_c J}{l^3}$ | $0{,}43M_1 l$ |
|  | 9,86 | $48{,}5\frac{E_c J}{l^3}$ | $0{,}5M_1 l$ |
|  | 3,52 | $3{,}1\frac{E_c J}{l^3}$ | $0{,}25M_1 l$ |

при расчете в горизонтальном направлении рассматривают как консольную цилиндрическую балку, которая нагружена равномерно распределенной массой экрана и сосредоточенной массой плиты. Верхний контур балки жестко защемлен, а нижний контур подкреплен жесткой плитой.

2.4.1.3. Технологический канал рассматривают как стержень переменного поперечного сечения, имеющий жесткую заделку в опорной плите и промежуточные шарнирные опоры в местах прохода канала через дистанционирующие перфорированные плиты. Стержень нагружен распределенной массой.

2.4.1.4. Привод системы управления и защиты (СУЗ) рассматривают как консольную стержневую систему, состоящую из трубчатых стержней ступенчато-переменного сечения, которые нагружены распределенной собственной массой и сосредоточенной массой приводных механизмов. Стержневая система имеет податливую заделку в крышке за счет податливости узла крепления привода СУЗ к крышке.

2.4.1.5. Трубки теплообменных аппаратов считают балками постоянного сечения, защемленными в опорах (трубных досках, диафрагмах) и нагруженными равномерно распределенной массой.

2.4.1.6. Плиты, диафрагмы, трубные доски, крышки, плоские экраны и другие аналогичные конструкции рассматривают как сплошные плиты. В зависимости от конструкции крепления контур плиты считается защемленным или свободно опирающимся. В случае расчета трубных досок или иных перфорированных конструкций в расчет вводятся приведенные характеристики, сводящие перфорированную плиту по жесткости к сплошной.

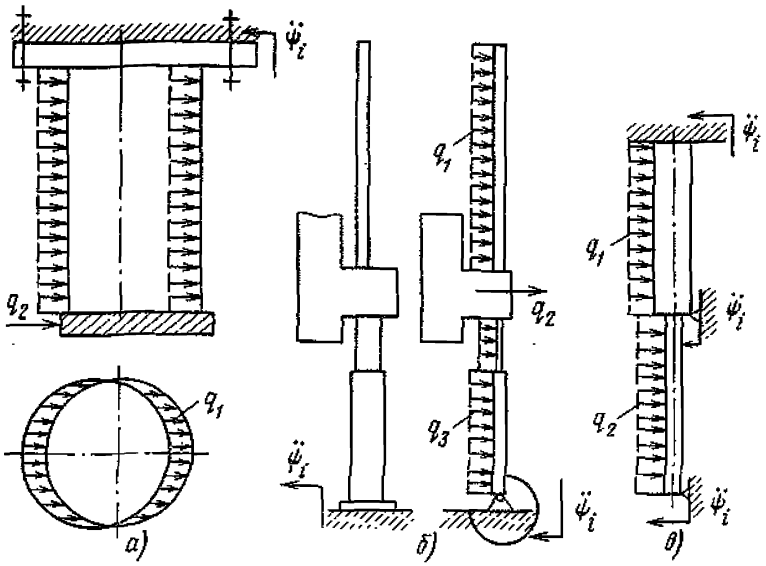



Рис. П9.6. Расчетные схемы типовых узлов:
*а* — выемная часть; *б* — привод СУЗ; *в* — технологический канал

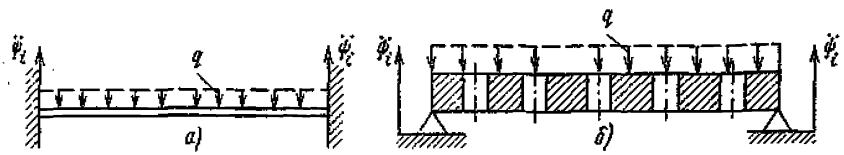



Рис. П9.7. Расчетные схемы типовых узлов:
*а* — трубка теплообменника; *б* — перфорированная плита

Принимается, что плита нагружена равномерно распределенной массой.

2.4.2. Расчет основных параметров механической модели для типовых деталей.

2.4.2.1. При расчете собственной частоты колебаний корпусного оборудования масса узлов крепления ввиду ее малости по сравнению с массой оборудования не учитывается.

Приведенная жесткость узла крепления определяется по формуле

$$C_{red}=\frac{C_{red,l}C_{red,w}z_l z_w}{C_{red,l}z_l+C_{red,w}z_w}.$$

Для болта в направлении его оси

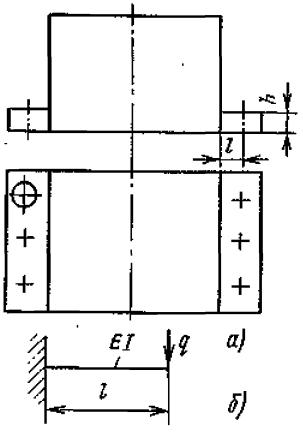



Рис. П9.8. Эскиз конструкции (*а*) и расчетная схема (*б*) узла крепления с лапами типа балок

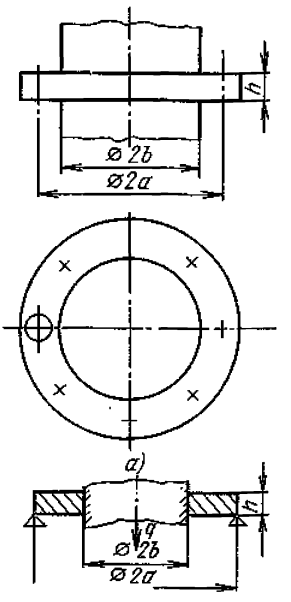



Рис. П9.9. Эскиз конструкции (*а*) и расчетная схема (*б*) узла крепления с опорными фланцами

$$C_{red,w}=\frac{E_w A_{sw}}{l_w}.$$

Приведенные коэффициенты жесткости лап (опорных фланцев, нажимных фланцев) вычисляют:

для лапы типа балка (рис. П9.8) — по формуле

$$C_{red,l}=\frac{3E\mathcal{J}}{l^3}C_Q;$$

$$C_Q=\frac{1}{1+0{,}75(s/l)^2};$$

для опорного фланца (рис. П9.9) — по формуле

$$C_{red,l}=\frac{Es^3}{a^2\alpha}C_Q;$$

$$C_Q=\frac{1}{1+0{,}6\frac{1}{\alpha}\left(\frac{s}{a}\right)^2\ln\frac{a}{b}},$$

где $a$, $b$ — размеры опорного фланца.

Таблица П9.5. **Значения коэффициента α**

| $a/b$ | 1,05 | 1,1 | 1,15 | 1,2 | 1,25 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| α | 0,0001 | 0,0004 | 0,0014 | 0,003 | 0,005 | 0,025 | 0,088 | 0,209 | 0,293 | 0,35 |

Численные значения коэффициентов α приведены в табл. П9.5.

Для секторных лап (рис. П9.10)

$$C_{red,l}=\frac{Es^3}{a^2\alpha}\frac{mZ_l}{2\pi a}C_Q,$$

где $m$ — длина дуги одной лапы, измеренная по окружности радиусом $a$. Значение $C_Q$ определяют так же, как для опорного фланца.

Для лап и опорных фланцев, подкрепленных ребрами жесткости (рис. П9.11),

$$C_{red,l}=\frac{3E_c\mathcal{J}}{l^3}C_Q z;$$

$$C_Q=\frac{1}{1+7{,}5\dfrac{\mathcal{J}K}{l^2A_s}};$$

$$K=\frac{A_s}{\mathcal{J}^2}\int_{-h_2}^{h_1}\frac{s^2(x)}{b(x)}dx,$$

где $z$ — число секций; $h_1$, $h_2$ — расстояния соответственно от верхней и нижней кромок поперечного сечения; $s(x)$ — статический момент инерции площади поперечного сечения; $b(x)$ — ширина секции.

Для крепления с помощью башмаков (рис. П9.12)

$$C_{red,l}=\frac{C'_{red,l}C''_{red,l}z^2C'_{red,w}}{C'_{red,w}C'_{red,l}z+C''_{red,l}C_{red,w}z^2+C'_{red,l}C''_{red,l}z},$$

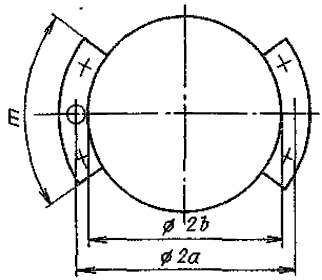
где $C'_{red,l}$ — приведенный коэффициент жесткости башмаков, вычисляемый по формулам для лап типа балок; $C''_{red,l}$ — приведенный коэффициент жесткости опорного фланца, вычисляемый по формулам для опорных фланцев; $z$ — число башмаков;

$$C'_{red,w}=C_{red,w}(a_w/b_w)^2;$$

$a_w$, $b_w$ — размеры башмаков (см. рис. П9.12). Для нажимного фланца (рис. П9.13)

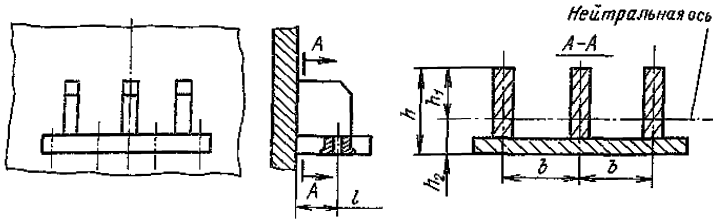
$$C_{red}=17{,}1\frac{aD}{(a-b)^3}C_Q; \qquad C_Q=\frac{1}{1+0{,}75[h/(a-b)]^2},$$

где $a$, $b$, $h$ — размеры нажимного фланца (см. рис. П9.13).




← Рис. П9.10. Схема узла крепления с секторными лапами

Рис. П9.11. Схема подкрепления лап и опорных фланцев ребрами жесткости




2.4.2.2. Приведенные коэффициенты жесткости и массу цилиндрического корпуса оборудования с креплением к фундаменту по схемам, представленным на рис. П9.14, *а* и *б*, определяют в следующем порядке.

При расчете колебаний в направлении оси корпуса в соответствии со схемой, представленной на рис. П9.14, *в*,

$$C_{red}=(EA_s)/l;$$

$$M_{red}=0{,}33M_1l.$$

Для корпусов с креплением в средней части (рис. П9.14, *б*)

$$l=l_1+l_2.$$

При расчете колебаний в поперечном направлении (рис. П9.14, *г*)

$$C_{red}=\frac{3E\mathcal{J}}{l^3}C_Q;$$

$$C_Q=\frac{1}{1+0{,}94\left(d_a^2+d^2\right)/l^2};$$

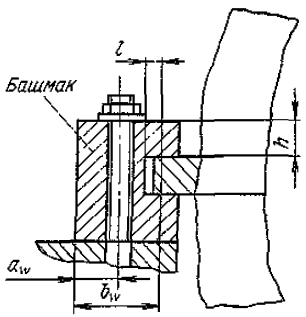
$$M_{red}=0{,}26M_1l.$$

Для двухопорного корпуса (рис. П9.15) при колебаниях в направлении, перпендикулярном оси,

$$C_{red}=\frac{48E_e\mathcal{J}}{l^3}C_Q;$$

$$C_Q=\frac{1}{1+3{,}75(d_a^2+d^2)/l^2};$$

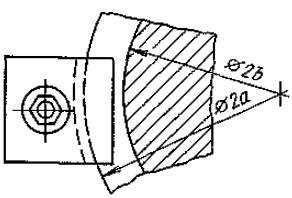
$$M_{red}=0{,}5M_1 l.$$




2.4.2.3. Приведенный коэффициент жесткости и массу для консольно закрепленного экрана определяют так же, как для корпусов, показанных на рис. П9.14. Для экранов с ограничителями перемещений (рис. П9.16) при расчете колебаний в поперечном направлении

$$C_{red}=\frac{103E_e\mathcal{J}}{l^3}C_Q;$$

$$C_Q=\frac{0{,}1+0{,}5\beta+4\beta^2}{0{,}1+2{,}5\beta+15{,}2\beta^2},$$




←
Рис. П9.12. Схема узла крепления с помощью башмаков

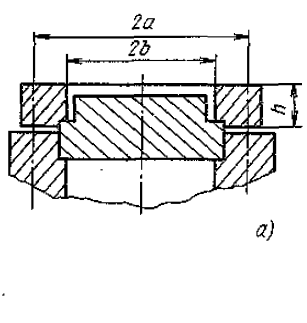



Рис. П9.13. Эскиз конструкции (*а*) и расчетная схема (*б*) узла крепления с нажимными фланцами

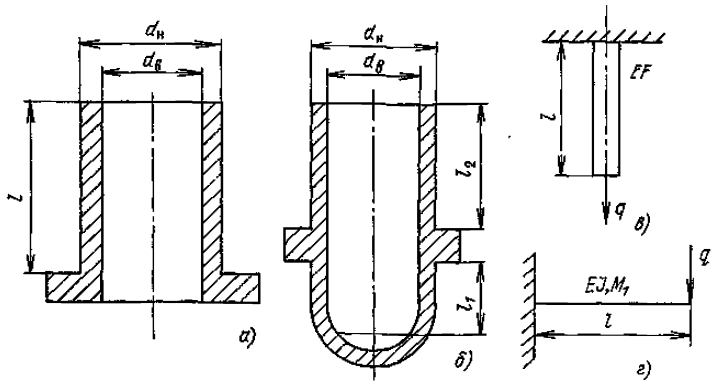



Рис. П9.14. Схема крепления корпуса к фундаменту в нижней (*а*) и средней (*б*) частях и расчетная схема для продольных (*в*) и поперечных (*г*) колебаний

где

$$\beta = \frac{d_a^2 + d^2}{l^2};$$

$$M_{red} = 0{,}43 M_1 l.$$

Расчетные значения $C_{red}$ и $M_{red}$ при колебаниях в направлении оси экрана определяют так же, как для корпусов при колебании их в продольном направлении (см. рис. П9.14, *в*).

2.4.2.4. При расчете приведенных коэффициентов жесткости и массы крышки или перфорированной плиты при $h/a > 0{,}3$ (рис. П9.17) крышку или плиту считают сосредоточенной массой. При $h/a \leqslant 0{,}3$ в случае поперечных колебаний значения $C_{red}$ и $M_{red}$ находят из следующих зависимостей:

для крышек, заглушек и других элементов типа сплошных круглых пластин

$$C_{red} = 32{,}4 D/a^2;$$

$$M_{red} = 0{,}3 M;$$

для перфорированных плит

$$C_{red} = 32{,}4 D \varphi_и / a^2;$$

$$M_{red} = 0{,}3 M,$$

где $\varphi_и$ — коэффициент ослабления при изгибе.

### 2.5. ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА

2.5.1. В основу линейно-спектрального метода положен метод приведения, который позволяет свести линейную систему

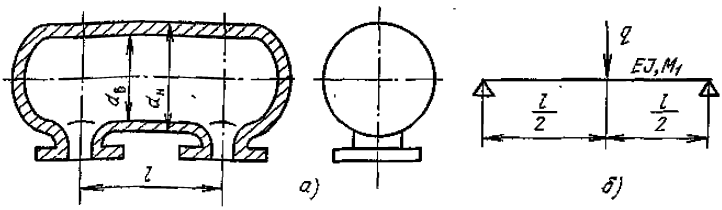
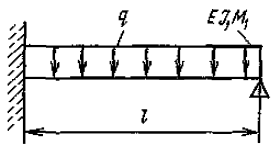



Рис. П9.15. Эскиз конструкции (*а*) и расчетная схема (*б*) крепления двухопорного корпуса к фундаменту

Рис. П9.16. Схема экрана с ограничителем перемещений




с $N$ степенями свободы к $N$ эквивалентным системам с одной степенью свободы, наложение колебаний которых дает в сумме колебание исходной системы.

2.5.2. Для использования метода приведения определяются собственные значения и векторы системы однородных алгебраических уравнений вида

$$\left([C]-\frac{1}{\lambda}[M]\right)\{x\}_j=0;\ \ j=1,\ 2,\ \ldots,\ N,$$

где $\{x\}_j=\{x_{1j}\ldots x_{ij}\ldots x_{Nj}\}$ — $j$-й собственный вектор, соответствующий собственному значению $\lambda_j$.

При этом собственная частота $j$-й формы колебаний

$$\omega_j=\sqrt{1/\lambda_j}.$$

2.5.3. При определении сейсмических нагрузок в расчете учитывают $S$ низших форм колебаний ($S\leqslant N$), собственная частота которых не превышает наибольшую частоту, для которой заданы спектры ответа.

2.5.4. Сейсмическую нагрузку, действующую в направлении $i$-й обобщенной координаты и соответствующую $j$-й форме собственных колебаний системы, определяют по формуле

$$S_{ij}=m_{ii}\ddot{\varphi}_j\Phi_j x_{ij},$$

где $\ddot{\varphi}_j$ — ускорение, определенное по спектру ответа для частоты $\omega_j$;

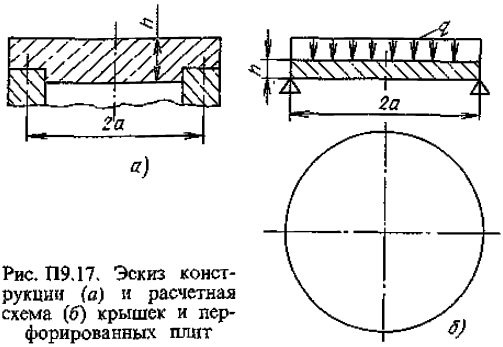



Рис. П9.17. Эскиз конструкции (*а*) и расчетная схема (*б*) крышек и перфорированных плит

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_{ii} x_{ij} \cos\alpha_i}{\sum_{i=1}^{N} m_{ii} x_{ij}^2}$$

— постоянная $j$-й формы колебаний; $\alpha_i$ — угол между направлениями сейсмического воздействия и $i$-й обобщенной координаты.

2.5.5. Внутренние усилия (напряжения) в связях расчетной модели определяют от действия статически приложенных в узлах сейсмических нагрузок $S_{ij}$ раздельно и суммируют для каждой формы колебаний по формуле

$$N_k^p = \sqrt{\sum_{j=1}^{s} N_{kj}^2},$$

где $N_k^p$ — расчетное усилие в $k$-м рассматриваемом сечении; $N_{kj}$ — усилие определенного вида в сечении $k$ для $j$-й формы колебаний.

2.5.6. Относительные перемещения расчетной модели в направлении $i$-й обобщенной координаты $j$-й формы колебаний определяют по формуле

$$q_{ij} = \frac{1}{\omega_j^2} \ddot{\varphi}_j \Phi_j x_{ij}.$$

Расчетное значение перемещения в направлении $i$-й обобщенной координаты находят так:

$$q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{s} q_{ij}^2}.$$

Эта зависимость может быть использована для определения скоростей и ускорений, если одновременно выполнено условие

$$\frac{\omega_k-\omega_{k-1}}{\omega_k}>0{,}1.$$

В случае, если это условие не выполнено, то расчетное значение определяют по формуле

$$q_i=\sqrt{\sum_{j=1}^{s}q_{ij}+\sum_{r=1}^{p}\left\{\sum_{m=1}^{nr}|q_{mr}|\right\}^2},$$

где $p$ — количество групп собственных частот, для которых выполняется условие $(\omega_k-\omega_{k-1})/\omega_k<0{,}1$.

2.5.7. Результирующие значения внутренних усилий, напряжений, а также перемещений, скоростей и ускорений в конструкции, которая была представлена совокупностью плоских стержневых расчетных моделей и рассчитывалась отдельно по каждому из взаимно перпендикулярных направлений, определяют по формуле

$$P_k^p=\sqrt{\sum_{n=1}^{n}P_{kn}^2},$$

где $P_k^p$ — результирующее значение параметра в $k$-м рассматриваемом сечении (узле); $P_{kn}$ — значение параметра определенного вида в $k$-м сечении (узле), полученное для $n$-го направления перемещений.

При этом должны быть учтены условия, оговоренные в п. 2.5.6.

Данный способ суммирования может быть также применен при использовании других методов расчета.

### 2.6. МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

2.6.1. При проведении расчетов методом динамического анализа в качестве внешнего сейсмического воздействия задаются акселерограммы движения оснований (опор) расчетной модели.

2.6.2. Динамический анализ систем с конечным числом степеней свободы, в том числе нелинейных при одинаковой закономерности кинематического возбуждения опор, проводится методами численного интегрирования систем дифференциальных уравнений вида

$$[M]\{\ddot{x}\}+[B]\{\dot{x}\}+[C]\{x\}+R=-\ddot{\psi}(t)[M]\{\cos\alpha\}.$$

2.6.3. Вектор реактивных сил $\{R\}$, действующих в направлении обобщенных координат системы, представляет собой сумму реакций дополнительных нелинейных связей системы: демпферов, амортизаторов, упругих упоров с зазорами (включающихся связей), элементов сухого трения и т. п.

2.6.4. Результирующий вектор внешних нагрузок, действующих на систему в любой момент времени, определяют по формуле

$$\{F\}=[C]\{x\}.$$

2.6.5. По вычисленному значению вектора $\{F\}$ определяют внутренние усилия и напряжения в расчетных сечениях системы.

## 3. МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 3.1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Приведенные в настоящем разделе методики могут быть использованы для расчета трубопроводов категории II.

Методики основаны на статистической теории сейсмостойкости конструкций.

### 3.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДОВ ПО СПЕКТРАМ ОТВЕТА

3.2.1. Дополнительные условные обозначения

$x, y, z$ — индексы системы координат трубопровода

$(\sigma_s)_{s2}$ — группа приведенных мембранных и общих изгибных напряжений только от сейсмических воздействий (спектра ответа ПЗ*)

$(\sigma_s)_{s2,x}$; $(\sigma_s)_{s2,y}$; $(\sigma_s)_{s2,z}$ — компоненты напряжения $(\sigma_s)_{s2}$

$\sigma_{\max,x(y,z)}$ — максимальное приведенное напряжение в трубопроводе от нагрузок собственной массы, приложенной по осям $x$, $y$ и $z$

$f_{1,x(y,z)}$ — первая собственная частота колебаний относительно оси $x$ ($y$ или $z$)

$K_h$ — коэффициент изменения максимального ускорения (сейсмического воздействия) по высоте сооружения. Для АЭС с ВВЭР значения этого коэффициента приведены в табл. П9.6

$A^0_{\max,x(y,z)}$ — коэффициент, равный значению максимального ускорения в долях $g$ по спектру ответа ПЗ для нулевой отметки при направлении сейсмического воздействия $x(y, z)$

$A^h_{\max,x(y,z)}$ — то же для максимальной отметки закрепления неподвижной опоры трубопровода

$A^h_{f1,x(y,z)}$ — коэффициент, равный значению ускорения в долях $g$ для соответствующей первой собственной частоты по спектру ответа ПЗ, при направлении сейсмического воздействия $x(y, z)$ с учетом максимальной отметки закрепления неподвижной опоры трубопровода

$\delta^s_{j,x(y,z)}$ — перемещение центра тяжести $j$-го участка тру-

---

* ПЗ — проектное землетрясение.

бопровода от сейсмических воздействий по оси $x(y, z)$

$\delta_j^{x(y,z)}$ — то же от нагрузок собственной массы по оси $x(y, z)$

Таблица П9.6. **Коэффициент $K_h$ для АЭС с ВВЭР**

| Характеристика сооружения | Максимальная отметка закрепления трубопровода | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 м | | 20 м | | 30 м | | 40 м | |
| | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента |
| Бокс (массивная железобетонная конструкция) | 1,2 | 1,0 | 1,5 | 1,2 | 1,75 | 1,6 | 2,0 | 2,0 |
| Оболочка (защитная) | 1,2 | 1,0 | 1,6 | 1,2 | 2,0 | 1,6 | 2,5 | 2,0 |
| Пространственная стержневая конструкция (каркасная компоновка несущих элементов) | 1,4 | 1,4 | 1,8 | 1,8 | 2,25 | 2,2 | 3,0 | 3,0 |

Примечание. Таблица применима для грунтов, имеющих модуль упругости $E \geqslant 10^4$ МПа. При $E < 10^5$ МПа значения коэффициента $K_h$ из этой таблицы следует умножить на 1,5.

3.2.2. Общие положения

3.2.2.1. Расчет трубопроводов на сейсмические воздействия проводят после выполнения расчетов на статические и циклические нагрузки и подтверждения их прочности при этих нагрузках.

3.2.2.2. Настоящий метод расчета заключается в статическом расчете напряжений $(\sigma_s)_{s2}$ в элементах трубопровода.

Расчет проводят с использованием программ и результатов статических расчетов трубопроводов на прочность. При этом к обычным статическим расчетам добавляется расчет при проектировании массовых нагрузок на координатные оси $x$, $y$, $z$.

Для программ, где предусмотрено задание нагрузки от собственной массы только в одном (вертикальном) направлении, необходимо изменить направления осей координат так, чтобы нагрузка собственной массы могла быть задана и в горизонтальном направлении.

3.2.2.3. Расчет $\sigma_{\max, x(y,z)}$ проводят при температуре 20° С, нулевых значениях «собственных» смещений концевых защемленных сечений и внутреннем давлении, равном нулю.

3.2.2.4. Расчет проводят для модуля упругости материала, соответствующего расчетной температуре стенки трубопровода.

3.2.2.5. Расчеты на прочность, а также выбор дополнительных опор, необходимых для обеспечения прочности при сейсмических воздействиях, проводят отдельно для каждого направления сейсмического воздействия.

Для оценки прочности при совместном действии трехкомпонентного сейсмического воздействия напряжения от сейсмических нагрузок определяют как корень квадратный из суммы квадратов напряжений от сейсмических нагрузок, полученных для отдельных направлений сейсмического воздействия.

При автоматизированных расчетах суммарные приведенные напряжения от учитываемых статических и сейсмических нагрузок определяют по усилиям, полученным от совместного действия этих нагрузок.

3.2.2.6. Сейсмическое воздействие задают спектрами ответа ПЗ.

3.2.2.7. Рекомендации по выбору расчетных схем трубопроводной системы следующие:

при раздельном рассмотрении колебаний трубопроводов относительно любой из трех координатных осей $(x, y, z)$ учитывают только те опоры, которые ограничивают перемещения трубопроводов по этой оси;

расчетную схему трубопроводной системы составляют с учетом всех ответвлений и присоединенного оборудования; влияние невключенных в расчетную схему ответвлений должно быть учтено в виде присоединенных масс и соответствующих связей.

3.2.3. Критерий сейсмической прочности.

Критерий сейсмической прочности определен с учетом требований табл. 5.14 настоящих Норм. Значения этого критерия определяют по зависимости

$$B_{x\,(y,z)} = \frac{1{,}9\,[\sigma] - (\sigma)_2}{(\sigma_s)_{s2}}.$$

Условия прочности трубопровода

$$B_{x\,(y,z)} \geqslant 1. \qquad (П9.1)$$

3.2.4. Для проведения расчетов необходимы следующие исходные данные:

1) геометрические и эксплуатационные параметры трубопроводной системы;

2) жесткостные характеристики опор;

3) значения напряжения $(\sigma)_2$ по результатам статических расчетов на прочность трубопроводов для режимов нормальных условий эксплуатации;

4) спектры ответов ПЗ на нулевой отметке и на отметках закрепления неподвижных опор трубопроводов.

3.2.5. Последовательность выполнения расчета.

Расчет проводят в следующей последовательности:

1) определяют $(\sigma_s)_{s2}$ для направлений сейсмических воздействий ПЗ, совпадающих с направлением действия нагрузок собственной массы, проецируемых на координатные оси трубопроводной системы;

2) проводят оценку прочности трубопровода по критерию сейсмической прочности (П9.1);

3) проверяют прочность опорных конструкций с учетом нагрузок от сейсмических воздействий;

4) положительное заключение о прочности дается при условии выполнения требований прочности по пп. 3.2.5.2 и 3.2.5.3.

3.2.6. Расчет $(\sigma_s)_{s2}$.

Расчет напряжений от сейсмических нагрузок проводят по следующим зависимостям:

1) при отсутствии спектра ответа на отметке закрепления неподвижных опор

$$(\sigma_s)_{s2,x} = 1{,}3 A^0_{\max,x} K_h \sigma_{\max,x} \qquad (П9.2)$$

и так же для других направлений сейсмического воздействия;

2) при наличии спектра ответа для отметки закрепления неподвижных опор

$$(\sigma_s)_{s2,x} = 1{,}3 A^h_{\max,x} \sigma_{\max,x} \qquad (П9.3)$$

и так же для других направлений сейсмического воздействия. При выполнении условия сейсмической прочности (П9.1) прочность обеспечена и дальнейшие расчеты можно не проводить;

3) если условие прочности (П9.1) не выполняется, проводят расчет с учетом первой собственной частоты колебаний

$$(\sigma_s)_{s2,x} = 1{,}3 A^h_{f\,1,x} \sigma_{\max,x} \qquad (П9.4)$$

и так же для других направлений сейсмического воздействия.

Первую собственную частоту колебаний для конкретного направления сейсмического воздействия допускается определять с использованием значений перемещений, полученных в результате расчетов при воздействии на трубопровод нагрузок собственной массы, проецируемых на координатные оси $x$ ($y$ или $z$):

$$f_{1,x} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \sum_{j=1}^{n} G_j \delta_j^x / \sum_{j=1}^{n} G_j (\delta_j^x)^2}, \qquad (П9.5)$$

где $G_j$ — вес $j$-го отрезка трубопровода с пролета между соответствующими точками схемы, применяемой для статических расчетов; $\delta_j^x (\delta_j^y, \delta_j^z)$ — перемещения центра тяжести $j$-го

отрезка при воздействии на трубопровод нагрузок собственной массы, проецируемой на одно из направлений осей координат по формуле (например, по оси $x$)

$$\delta_j^x = \sqrt{(\delta_{j,x}^x)^2 + (\delta_{j,y}^x)^2 + (\delta_{j,z}^x)^2}, \qquad (П9.6)$$

где $\delta_{j,x}^x$, $\delta_{j,y}^x$, $\delta_{j,z}^x$ — проекции перемещений $j$-го сечения на ось $x$ от нагрузок собственной массы, приложенных по оси $x$.

Для других направлений сейсмического воздействия расчет частоты выполняется аналогично.

Для случаев, когда все входящие в состав расчетной схемы ответвления значительно различаются по жесткостным и инерционным характеристикам, расчет частот $f_{1,x}$, $f_{1,y}$, $f_{1,z}$ проводят для каждого ответвления по перемещениям, создаваемым нагрузками собственной массы при учете совместной работы всех ответвлений.

Для трубопроводов, содержащих ответвления, у которых параметр вида $\sqrt{EJ/M_1}$ отличается от соответствующего параметра магистрального трубопровода не более чем в 2 раза, оценку сейсмической прочности проводят по первой собственной частоте ($f_x$, $f_y$, $f_z$).

Для расчета указанных частот могут быть использованы и другие методы, которые хорошо согласуются с возможностями программы статического расчета.

Если условия прочности не выполняются, то устанавливают дополнительные опоры или амортизаторы в направлении тех координатных осей, для которых условия прочности не выполняются. Затем по схеме с дополнительными опорами и амортизаторами повторяют статический расчет трубопровода на самокомпенсацию и повторно проводят расчеты на сейсмические воздействия по п.3.2.5 настоящего раздела.

3.2.7. Определение сейсмических нагрузок от трубопровода на оборудование и неподвижные опоры.

Определяют коэффициенты эквивалентности сейсмических нагрузок статическим по формулам

$$K_x = \frac{(\sigma_s)_{s2,x}}{\sigma_{mas,x}}; \quad K_y = \frac{(\sigma_s)_{s2,y}}{\sigma_{mas,x}}; \quad K_z = \frac{(\sigma_s)_{s2,z}}{\sigma_{mas,x}}. \qquad (П9.7)$$

Для неподвижных опор и оборудования сейсмическую нагрузку определяют как произведение статических нагрузок от режимов нормальных условий эксплуатации и коэффициентов $K_x$, $K_y$, $K_z$:

$$\left.\begin{aligned} \pm M_x^s &= M_x K_x; \quad \pm Q_x^s = Q_x K_x; \\ \pm M_y^s &= M_y K_y; \quad \pm Q_y^s = Q_y K_y; \\ \pm M_z^s &= M_z K_z; \quad \pm N^s = N K_z, \end{aligned}\right\} \qquad (П9.8)$$

где $M$, $Q$ и $N$ — момент, поперечная и продольная силы.

Принимают, что сейсмические нагрузки совпадают по знаку со статическими нагрузками от режимов нормальных условий эксплуатации.

3.2.8. Определение сейсмических нагрузок для промежуточных опор.

Значение сейсмической нагрузки на промежуточные скользящие опоры или простые подвески определяют по зависимости

$$\pm N^s = N_j K_z, \qquad (П9.9)$$

где $N_j$ — нагрузка на эту опору по результатам статических расчетов от режимов нормальных условий эксплуатации.

Для определения дополнительных нагрузок на пружинные опоры вводят коэффициент $K_0^s$:

$$K_0^s = K_z + 0{,}7\sqrt{K_x^2 + K_y^2}. \qquad (П9.10)$$

Сейсмические нагрузки для этого случая равны усилиям на опоры от статических нагрузок режимов нормальных условий эксплуатации, умноженным на коэффициент $K_0^s$, т. е.

$$\pm N_j^s = K_0^s N_j. \qquad (П9.11)$$

3.2.9. Назначение мероприятий сейсмозащиты

Процедуры назначения мероприятий сейсмозащиты проводятся, если сейсмопрочность не обеспечена, и сводятся к следующему:

1) выбирают тип дополнительных опор: неподвижные опоры (тогда схема разбивается на несколько самостоятельных), промежуточные скользящие опоры, простые или пружинные подвески, амортизаторы;

2) определяют места установки опор или амортизаторов, их предварительное количество и в соответствии с п. 3.2.3. находят критерии сейсмической прочности $B_{x(y,z)}$.

Приняв всю длину трубопровода за $L$, считают, что при $B_x = 1$ длина проекции трубопровода на ось $x$, равная $L_x$, удовлетворяет условию сейсмической прочности.

При $B_x < 1$ условие сейсмической прочности не выполняется, соответственно длина $L_x$ может содержать два или больше участков, а число дополнительных опор или амортизаторов на длине $L_x$ больше или равно единице. Длина участка, удовлетворяющая условию сейсмической прочности,

$$l_x = B_x L_x. \qquad (П9.12)$$

Тогда необходимое число дополнительных опор или амортизаторов $n = L_x/l_x$ (число опор округляется до целого в большую сторону). Это минимальное число опор, при котором, возможно, будет удовлетворяться условие сейсмической прочности.

Места установки опор определяют конструктивно, причем длина межопорных участков должна быть не меньше $l_x$;

3) проводят статический расчет $\sigma_{mas}$ для той координатной оси, относительно которой устанавливаются дополнительные опоры или амортизаторы;

4) проверяют условие сейсмической прочности в соответствии с п. 3.2.5.

Окончательное число амортизаторов определяют после поверочного расчета.

Целесообразно унифицировать мощность амортизаторов по значению максимальных усилий.

3.2.10. В тех случаях, когда требуется проводить оценку сейсмостойкости по перемещениям, для расчета перемещений от сейсмических нагрузок допускается использовать формулу вида

$$\delta^s_{j,x} = 1{,}3 A^h_{f_1,x(y,z)} \delta^{x(y,z)}_j. \qquad (П9.13)$$

В случае отсутствия поэтажных спектров ответа расчеты перемещений могут быть выполнены по формулам

$$\delta^s_{j,x} = 1{,}3 A^0_{f_1,x(y,z)} K_h \delta^{x(y,z)}_j. \qquad (П9.14)$$

или

$$\delta^s_{j,x} = 1{,}3 A^0_{\max,x(y,z)} K_h \delta^{x(y,z)}_j. \qquad (П9.15)$$

Суммарные перемещения от сейсмических нагрузок в каждом $j$-м сечении трубопровода допускается рассчитывать по зависимости

$$\delta^s_j = \sqrt{(\delta^s_{j,x})^2 + (\delta^s_{j,y})^2 + (\delta^s_{j,z})^2}. \qquad (П9.16)$$

### 3.3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДОВ ПО ОБОБЩЕННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

3.3.1. Выполняют три отдельных расчета трубопровода на действие весовой нагрузки (расчеты 1, 2, 3). Нагрузку поэтапно прикладывают в вертикальном (по оси $z$) и двух горизонтальных направлениях (по осям $x$ и $y$). В каждом отдельном расчете определяют приведенные напряжения $(\sigma)_x$, $(\sigma)_y$, $(\sigma)_z$, усилия в опорах и составляющие перемещения сечений трубопровода в направлении главных осей ($x$, $y$, $z$). Давление в трубопроводе и усилия затяжки упругих опор принимают равными нулю. При расчетах учитывают жесткости всех опор и амортизаторов.

3.3.2. Определяют приближенное значение первой собственной частоты колебаний трубопровода по формуле

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\delta_{\max}}},$$

где $\delta_{max}$ — максимальное абсолютное значение составляющих перемещений трубопровода по одной из осей при действии

весовой нагрузки отдельно по каждому из принятых направлений.

3.3.3. Вычисляют результирующее значение спектрального ускорения по формуле

$$A_p = \sqrt{A_x^2(f_1) + A_y^2(f_1) + A_z^2(f_1)},$$

где $A_x(f_1)$, $A_y(f_1)$, $A_z(f_1)$ — ускорения (в долях $g$), определенные по спектрам ответа ПЗ при частоте $f_1$, заданных для трех направлений сейсмического воздействия на наивысшей отметке закрепления трубопровода.

3.3.4. Определяют значения приведенных напряжений в сечениях трубопровода от действия сейсмических и эксплуатационных нагрузок по формуле

$$(\sigma_s)_2 = A_p \sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} + (\sigma)_2,$$

где $(\sigma)_x$, $(\sigma)_y$, $(\sigma)_z$ — приведенные напряжения, полученные расчетами 1, 2, 3.

Для прямолинейных отрезков трубопровода допускается определять напряжение $(\sigma_s)$ следующим образом:

если $A_p \sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} \leqslant 0{,}5\sigma_\theta$, то

$$(\sigma_s)_2 = \sigma_\theta;$$

если же $A_p \sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} > 0{,}5\sigma_\theta$, то

$$(\sigma_s)_2 = A_p \sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} + 0{,}5\sigma_\theta,$$

где $\sigma_\theta$ — кольцевое общее мембранное напряжение в трубе от расчетного давления.

3.3.5. Усилия воздействия трубопровода на оборудование при совместном действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок определяют по формуле

$$Q_s = A_p \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2 + Q_z^2} + |Q|,$$

где $Q_s$ — компонента вектора усилий (любая из сил по осям $x$, $y$, $z$, любой момент относительно осей $x$, $y$, $z$) при совместном действии нагрузок; $Q$ — значение той же компоненты, определяемое расчетом трубопровода на действие только эксплуатационных нагрузок; $Q_x$, $Q_y$, $Q_z$ — значения той же компоненты, определенные в расчетах 1, 2, 3.

3.3.6. Нагрузки $P_{sz}$ (по оси $z$) упругих (пружинных) подвесок при совместном действии сейсмических и эксплуатационных нагрузок находят по формуле

$$P_{sz} = K_0 A_p \sqrt{\delta_{z,x}^2 + \delta_{z,y}^2 + \delta_{z,z}^2} + P,$$

где $\delta_{zx}$, $\delta_{zy}$, $\delta_{zz}$ — перемещения по оси $z$ трубопровода в месте установки подвески, определяемые в расчетах 1, 2, 3; $P$ — нагрузка подвески по оси $z$ при нормальных условиях эксплуатации; $K_0$ — коэффициент жесткости подвески.

3.3.7. Реакции опор скольжения и направляющих опор вычисляют аналогично п. 3.2.5. Например, реакцию по оси $z$ определяют по формуле

$$R_s = A_p \sqrt{R_{zx}^2 + R_{zy}^2 + R_{zz}^2} + |R|,$$

где $R_{zx}$, $R_{zy}$, $R_{zz}$ — реакции опоры по оси $z$, определяемые в расчетах 1, 2, 3; $R$ — реакция опоры по оси $z$, определяемая расчетом трубопроводов на действие только эксплуатационных нагрузок.

3.3.8. Реакцию амортизатора определяют по п. 3.3.7, причем его реакцию при эксплуатационных нагрузках принимают равной нулю.

3.3.9. Оценку сейсмопрочности по полученным приведенным напряжениям $(\sigma_s)_2$ проводят в соответствии с разд. 5.11 настоящих Норм.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 10*
(рекомендуемое)

## ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ФЛАНЦЕВ, НАЖИМНЫХ КОЛЕЦ И КРЕПЕЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ

### 1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$D$ — внутренний диаметр фланца, мм
$D_w$ — диаметр окружности шпилек, мм
$D_f$ — наружный диаметр фланца и бурта свободного фланца, мм
$D_m$ — расчетный диаметр прокладки, мм
$D_{m1}$, $D_{m2}$ — средние диаметры профильных прокладок, мм
$D_d$ — наружный диаметр прокладки, мм
$D_1$ — внутренний диаметр нажимного кольца, мм
$D_2$ — наружный диаметр нажимного кольца, мм
$d_0$ — диаметр отверстия для шпилек, мм
$d_1$ — внутренний диаметр резьбы шпилек, мм
$d_s$ — минимальный диаметр стержня шпильки, мм
$d_c$ — диаметр центрального отверстия в шпильке, мм
$h_1$ — высота цилиндрической части тарельчатого фланца толщиной $s_1$, мм
$h_2$ — высота конусной части тарельчатого фланца, мм
$h_f$ — высота фланца и опорного бурта, мм
$h_{f1}$ — высота нажимного кольца, мм
$s_1$ — номинальная толщина стенки цилиндрического участка фланца, мм
$s_2$ — номинальная толщина стенки конического перехода у основания, мм

$l_w$ — шаг шпилек, мм
$b_0$ — ширина прокладки, мм
$b$ — эффективная ширина прокладки, мм
$\delta$ — толщина прокладки, мм
$q_0$ — удельное давление на прокладку при затяге шпилек, МПа
$p$ — расчетное давление, МПа
$p_h$ — давление гидроиспытания, МПа
$F_d$ — усилие обжатия прокладки, Н
$F_{2h}$ — усилие, обеспечивающее герметичность при гидроиспытании, Н
$F_p$ — растягивающее усилие в шпильках от расчетного давления, Н
$F_{ph}$ — растягивающее усилие в шпильках от давления гидроиспытания, Н
$F_0$ — усилие затяга шпилек, Н
$F_1$ — усилие в цилиндрическом участке фланца от действия внутреннего давления, Н
$F_2$ — усилие, обеспечивающее герметичность при рабочем давлении, Н
$F_3$ — усилие от действия давления среды на внутренний участок тарелки фланца, Н
$[\sigma]$ — допускаемое номинальное напряжение во фланце, МПа
$[\sigma]_w$ — допускаемое номинальное напряжение в шпильках, МПа
$M$ — максимальный изгибающий момент, Н·мм
$e_i$ — плечи действия сил, мм
$z$ — число шпилек

## 2. ВЫБОР УПЛОТНЕНИЯ

2.1. Для обеспечения герметичности оборудования уплотнение рекомендуется выбирать в зависимости от типа и конструкции фланцевого соединения согласно рис. П10.1 и табл. П10.1.

Для выбора материала прокладки следует использовать рекомендации, приведенные в табл. П10.2.

2.2. Наружный диаметр прокладки определяют по формуле

$$D_d = D + 2b_0 + 2u, \qquad (П10.1)$$

где $u$ — расстояние от внутренней кромки фланца до внутреннего диаметра прокладки; в зависимости от типа, материала прокладки и ее толщины $\delta$ рекомендуется принимать $u$ в соответствии с табл. П10.3.

2.3. Расчетный диаметр прокладки определяют по формуле

$$D_m = D_d - b_0. \qquad (П10.2)$$

Таблица П10.1. **Рекомендуемые значения ширины прокладки**

| Тип прокладки | Диаметр фланца $D$, мм | Ширина прокладки $b_0$, мм | Область применения |
|---|---|---|---|
| Плоские неметаллические | $D \leqslant 1000$<br>$1000 < D \leqslant 2000$<br>$D > 2000$ | 10—20<br>15—30<br>$\geqslant 25$ | Плоские уплотняющие поверхности гладкие |
| Плоские металлические | $D \leqslant 1000$<br>$D > 1000$ | 10—25<br>$\geqslant 15$ | Плоские уплотняющие поверхности гладкие или с кромками |
| Плоские комбинированные | $D \leqslant 2000$ | 10—20 | Плоские уплотняющие поверхности гладкие |
| Зубчатые металлические | $D > 2000$ | $\geqslant 15$ | Плоские уплотняющие поверхности гладкие |
| Профильные, $p > 6{,}4$ МПа | $D \leqslant 400$<br>$400 < D \leqslant 700$<br>$700 < D \leqslant 1000$<br>$D > 1000$ | $\geqslant 5$<br>$\geqslant 6$<br>$\geqslant 8$<br>$\geqslant 10$ | Профильные прокладки в пазах |

Таблица П10.2. **Рекомендуемые расчетные параметры уплотнения**

| Материал прокладки | Расчетное давление, МПа | Расчетная температура, °С |
|---|---|---|
| Резина твердая | 10 | От −30 до 60 |
| Фторопласт | 20 | От −75 до 250 |
| Паронит | 15 | От 0 до 400 |
| Алюминий и его сплавы | 50 | От −196 до 250 |
| Медь и ее сплавы | 70 | От −196 до 350 |
| Перлитная сталь | 70 | От −30 до 450 |
| Аустенитная сталь | 100 | От −253 до 600 |

Таблица П10.3. **Значения расстояния $a$ для различных типов прокладок**

| Тип прокладки и материала | $a$ не менее, мм |
|---|---|
| Комбинированные и зубчатые | $\delta$ |
| Профильные | $3\delta$ |
| Плоские мягкие | $2\delta$ |
| Плоские металлические | $\delta$ |

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ШПИЛЬКАХ

3.1. Усилие, необходимое для обжатия прокладки, находят по формуле

$$F_a = \pi D_m b q_0, \qquad (П10.3)$$

а минимальное усилие, обеспечивающее герметичность фланцевого соединения при рабочем давлении и гидроиспытании, — по формулам

$$F_2 = \pi D_m b m p \varkappa; \qquad (П10.4)$$

$$F_{2h} = \pi D_m b m p_h, \qquad (П10.5)$$

где $m$ — прокладочный коэффициент; $\varkappa$ — коэффициент, учитывающий прочность прокладок в рабочих условиях.

Для металлических прокладок $\varkappa$ принимают равным единице, а для мягких и комбинированных прокладок $\varkappa$ выбирают в зависимости от температуры среды по табл. П10.4.

3.2. Минимальное удельное уплотняющее давление $q_0$, прокладочный коэффициент $m$ и эффективную ширину прокладок для выбранного типа прокладки и материала определяют в соответствии с табл. П5.6.

3.3. Растягивающие усилия в шпильках от рабочего давления и давления гидроиспытаний получают по формулам

$$F_p = 0{,}785 D_m^2 p; \qquad (П10.6)$$

$$F_{ph} = 0{,}785 D_m^2 p_h. \qquad (П10.7)$$

3.4. Растягивающие усилия затяга шпилек должны удовлетворять следующим условиям:

$$F_0 \geqslant \max\{F_a,\ F_2 + F_p,\ F_{2h} + F_{ph}\}. \qquad (П10.8)$$

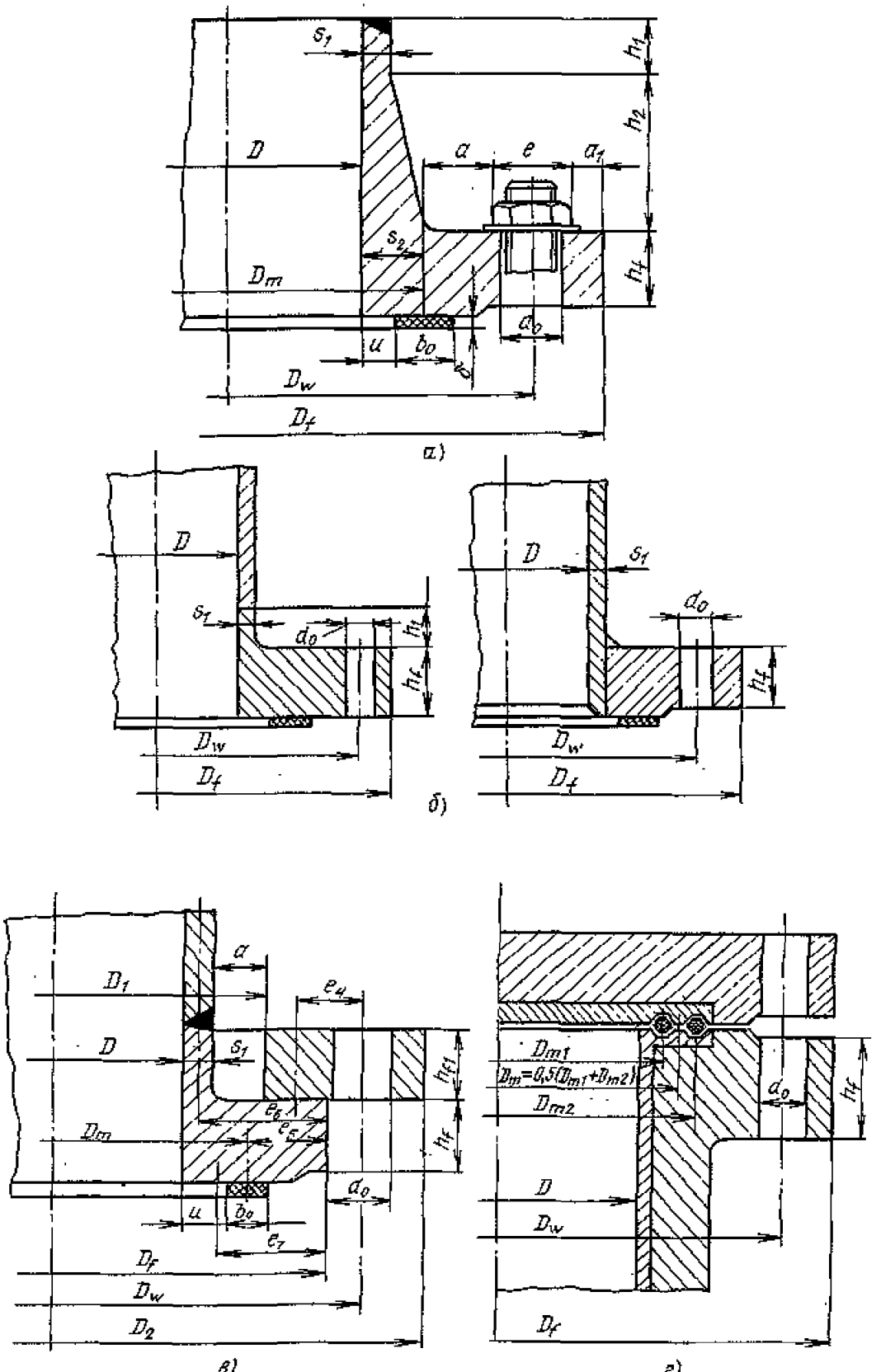
3.5. Минимальный диаметр стержня шпильки получают по формуле

$$d_s = \sqrt{1{,}27 \frac{F_0}{z[\sigma]_w} + d_c^2}. \qquad (П10.9)$$

3.6. Наружный диаметр шпильки выбирают с учетом табл. П10.5 в зависимости от минимального диаметра стержня шпильки [см. формулу (П10.9)]; уточнение этого диаметра осуществляется при выборе шага резьбы.

Таблица П10.4. **Значения коэффициента $\varkappa$**

| Расчетная температура, °С | 20 | 200 | 300 |
|---|---|---|---|
| $\varkappa$ | 1,0 | 1,5 | 2,0 |


а)
б)
в)
г)

← Рис. П10.1. Типы тарельчатых фланцев:
*а*—фланец с коническим переходом; *б*—плоские фланцы; *в*—фланец с нажимным кольцом; *г*—фланец с профильными прокладками

Таблица *П10.5.* **Параметры для выбора резьбы шпилек и размеров фланцев**

| Резьба шпилек | М16 | М20 | М22 | М24 | М27 | М30 | М36 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $d_1$ | 13,55 | 16,93 | 18,93 | 20,32 | 23,32 | 25,70 | 31,10 |
| $d_0$ | 18 | 23 | 25 | 27 | 30 | 33 | 40 |
| $e$ | 28 | 35 | 39 | 42 | 47 | 53 | 64 |
| $a$ | 9 | 10 | 10 | 11 | 12 | 12 | 14 |
| $2a_1$ | 6 | 6 | 8 | 10 | 10 | 10 | 14 |

| Резьба шпилек | М42 | М44 | М48 | М52 | М56 | М60 | М64 | М68 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $d_1$ | 36,15 | 36,50 | 41,87 | 45,87 | 49,25 | 53,25 | 56,64 | 60,64 |
| $d_0$ | 46 | 48 | 52 | 58 | 62 | 66 | 70 | 75 |
| $e$ | 75 | 75 | 87 | 93 | 98 | 104 | 110 | 116 |
| $a$ | 15 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| $2a_1$ | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 4.1. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ УЧАСТОК ФЛАНЦА

4.1.1. Толщина стенки $s_1$ цилиндрического участка фланца с коническим переходом, а также толщина стенки цилиндрической части плоского фланца должны быть не меньше фактической толщины стенки привариваемого изделия. При этом во всех случаях $s_1$ должна быть не менее 5 мм.

4.1.2. Высота $h_1$ цилиндрического участка фланца с коническим переходом должна приниматься равной $s_1$, но не менее 10 мм.

Таблица П10.6. **Значения коэффициента α**

| $p$, МПа | 0,1—0,25 | 0,6 | 1,0 | 1,6 | 2,5 | 4,0 | 6,4 | 10,0 | 20,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| α | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,8 |

### 4.2. КОНИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД

4.2.1. Толщину конического перехода у основания фланца первоначально определяют по формуле

$$s_2 = \alpha s_1, \qquad (П10.10)$$

где α—коэффициент пропорциональности, определяемый по табл. П10.6 с использованием линейной интерполяции.

4.2.2. Уклон конического перехода должен находиться в пределах $2 \leqslant i \leqslant 4$, где

$$i = \frac{h_2}{s_2 - s_1}. \qquad (П10.11)$$

### 4.3. РАЗМЕРЫ ТАРЕЛКИ ФЛАНЦА

4.3.1. Диаметр окружности шпилек и наружный диаметр фланца определяют по следующим формулам:

1) для фланцев с коническим переходом

$$D_w \geqslant \max\{D + 2s_2 + 2a + e;\ D_d + d_0 + 10\}; \qquad (П10.12)$$

$$D_f = D_w + e + 2a_1; \qquad (П10.13)$$

2) для плоского фланца

$$D_w \geqslant \max\{D + 2s_1 + 2a + e;\ D_d + d_0 + 10\}; \qquad (П10.14)$$

$D_f$ определяют по формуле (П10.13);

3) для плоского приварного фланца

$$D_w \geqslant \max\{D + 4s_1 + 2a + e;\ D_d + d_0 + 10\}; \qquad (П10.15)$$

$D_f$ получают по формуле (П10.13);

4) для нажимного кольца $D_w$ определяют по формуле (П10.14):

$$D_1 = D + 2s_1 + 2a; \qquad (П10.16)$$

$$D_2 = D_w + e + 2a_1; \qquad (П10.17)$$

5) для опорного бурта

$$D_f = D_w - d_0 - (2 \div 8), \qquad (П10.18)$$

где геометрические размеры $a$, $a_1$, $e$ и $d_0$ (см. рис. П10.1) находят по табл. П10.5 в зависимости от выбранного наружного диаметра шпильки.

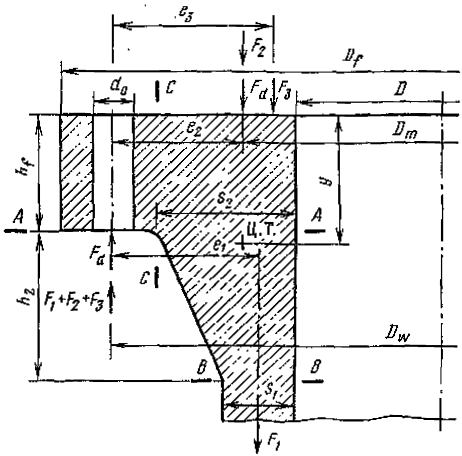



Рис. П10.2. Расчетная схема тарельчатого фланца

4.3.2. Шаг шпилек определяют по формуле

$$l_w = \pi D_w / z, \qquad (П10.19)$$

где количество шпилек $z$ выбирают из соотношения

$$z = \pi D_w / [(4 \div 5)\, d_0]. \qquad (П10.20)$$

Полученное значение $z$ рекомендуется принимать кратным четырем.

## 5. ИЗГИБАЮЩИЕ МОМЕНТЫ

5.1. Изгибающие моменты во фланцах от усилий обжатия прокладки $F_d$ и усилий, действующих в рабочем состоянии, $F_1$, $F_2$ и $F_3$ (рис. П10.2) определяют следующим образом:

1) от усилия обжатия прокладки $F_d$ — по формуле

$$M_d = F_d e_2, \qquad (П10.21)$$

где

$$e_2 = (D_w - D_m)/2; \qquad (П10.22)$$

2) от усилий, действующих в рабочем состоянии, — по формуле

$$M_p = F_1 e_1 + F_2 e_2 + F_3 e_3, \qquad (П10.23)$$

где

$$F_1 = 0{,}785 D^2 p; \qquad (П10.24)$$

$$F_3 = 0{,}785 \left(D_m^2 - D^2\right) p; \qquad (П10.25)$$

$$e_1 = 0{,}5 \left(D_w - D - s_1\right); \qquad (П10.26)$$

$$e_3 = 0{,}5 \left[D_w - \left(D_m + D\right)/2\right]; \qquad (П10.27)$$

$F_2$ и $e_2$ находят по формулам (П10.4) и (П10.22).

5.2. Изгибающие моменты в нажимном кольце определяют так:

1) от усилия обжатия прокладки $F_d$ — по формуле

$$M_d = F_d e_4, \qquad (П10.28)$$

где

$$e_4 = 0{,}5 \left[D_w - \left(D_1 + D_f\right)/2\right]; \qquad (П10.29)$$

2) от усилий, действующих в рабочем состоянии, — по формуле

$$M_p = \left(F_1 + F_2 + F_3\right) e_4. \qquad (П10.30)$$

5.3. Изгибающие моменты в опорном бурте определяют:

1) от усилия обжатия прокладки $F_d$ — по формуле

$$M_d = F_d e_5, \qquad (П10.31)$$

где

$$e_5 = 0{,}5 \left(D_f - D_m\right); \qquad (П10.32)$$

2) от усилий, действующих в рабочем состоянии, — по формуле

$$M_p = F_1 e_6 + F_2 e_5 + F_3 e_7, \qquad (П10.33)$$

где

$$e_6 = 0{,}5 \left(D_f - D - s_1\right); \qquad (П10.34)$$

$$e_7 = 0{,}5 \left[D_f - \left(D + D_m\right)/2\right]; \qquad (П10.35)$$

$F_1$, $F_2$, $F_3$ и $e_5$ находят по формулам (П10.4), (П10.24), (П10.25) и (П10.32).

5.4. Изгибающие моменты $M_h$ во фланцах, нажимном кольце и опорном бурте от давления гидравлического испытания $p_h$ определяют по формулам пп. 5.1 — 5.3 настоящего приложения. При этом в формулах (П10.24) и (П10.25) вместо расчетного давления $p$ подставляют давление гидравлического испытания $p_h$, а усилие от расчетного давления $F_2$, определяемое по формуле (П10.4), заменяют усилием от гидравлического испытания $F_{2h}$, определяемым по формуле (П10.5).

5.5. Максимальный (расчетный) изгибающий момент от усилий, действующих на фланцы, нажимное кольцо и опорный бурт, определяют по формуле

$$M = \max \left\{M_d;\ M_p;\ M_h\right\}. \qquad (П10.36)$$

## 6. ВЫСОТА ТАРЕЛКИ ФЛАНЦА

6.1. Высоту тарелки плоского фланца, нажимного кольца и опорного бурта определяют по формуле

$$h_f = \sqrt{\frac{1{,}27\frac{M}{[\sigma]} - X}{Y}}, \qquad (П10.37)$$

где величины $X$ и $Y$ вычисляются следующим образом:

1) для плоского фланца

$$X = (s_1^2 - s_0^2/4)(D + s_1); \qquad (П10.38)$$

$$Y = D_f - D - 2d_0, \qquad (П10.39)$$

где

$$s_0 = \frac{pD}{2[\sigma]}; \qquad (П10.40)$$

2) для опорного бурта

$$Y = D_f - D, \qquad (П10.41)$$

а $X$ определяют по формуле (П10.38).

6.2. Высоту нажимного кольца $h_{f1}$ находят по формуле (П10.37), где

$$X = 0; \qquad (П10.42)$$

$$Y = D_2 - D_1 - 2d_0. \qquad (П10.43)$$

6.3. Если $h_f \leqslant s_1$ или подкоренное выражение в формуле (П10.37) меньше нуля, то для определения высоты тарелки плоского фланца и опорного бурта по формуле (П10.37) величину $X$ принимают равной нулю, а

$$Y = D + 2s_1. \qquad (П10.44)$$

6.4. Высота тарелки фланца с коническим переходом.

6.4.1. Высоту тарелки фланца с коническим переходом первоначально определяют по формуле

$$h_f = s_2\left(\frac{pD}{1000}\right)^{0.14}, \qquad (П10.45)$$

но не менее $0{,}8s_2$.

Принятое значение $h_f$ уточняют в процессе расчета напряженного состояния фланца в сечениях $A—A$, $B—B$, $C—C$ (см. рис. П10.2).

6.4.2. Моменты сопротивления фланца в расчетных сечениях вычисляют следующим образом:

1) в сечении $A—A$

$$W_A=\frac{\pi}{4}\left[(D_f-D-2d_0)h_f^2+(D+s_2)\left(s_2^2-\frac{s_0^2}{4}\right)\right]; \quad (П10.46)$$

2) в сечении $B-B$

$$W_B=\pi\left[(D_f-D-2d_0)y^2+0{,}25(D+s_1)(s_1^2-s_0^2/4)\right], \quad (П10.47)$$

если $y\leqslant h_f$, и

$$W_B=2\pi\left[\frac{s_2-s_0}{3h_2}(h_f+h_2-y)^3+s_1(h_f+h_2-y)^2+\right.$$
$$\left.+0{,}125(D+s_1)(s_1^2-s_0^2/4)\right], \quad (П10.48)$$

если $y>h_f$.

В формулах (П10.47) и (П10.48) ординату центра тяжести поперечного сечения фланца вычисляют по формуле

$$y=\frac{(s_1+s_2)h_fh_2+0{,}33h_2^2(s_2+2s_1)+0{,}5h_f^2(D_f-D-2d_0)}{(s_1+s_2)h_2+(D_f-D-2d_0)h_f}; \quad (П10.49)$$

3) в сечении $C-C$

$$W_C=\frac{\pi}{4}(D_f-2d_0)h_f^2, \text{ если } h_f\leqslant s_2. \quad (П10.50)$$

Если же $h_f>s_2$, то прочность фланца в сечении $C-C$ обеспечена и $W_C$ не определяют.

6.4.3. Условия прочности в расчетных сечениях $A-A$, $B-B$, $C-C$ проверяют по формуле

$$\sigma=\max\{M/W_A;\ M/W_B;\ M/W_C\}\leqslant[\sigma]. \quad (П10.51)$$

Если расчетные напряжения $\sigma$ превышают допускаемые $[\sigma]$, то значения $h_f$, $s_2$ и $h_2$ следует увеличить. При этом предварительно необходимо увеличить конусность $i$.

Принимаемые значения $h_f$ и $s_2$ рекомендуется увеличить в $\sqrt{\sigma/[\sigma]}$ раз. При принятых размерах фланцев расчеты следует повторять по формулам пп. 4—6 настоящего приложения до тех пор, пока значения расчетных напряжений не будут равны (с погрешностью не более 5%) или меньше допускаемых напряжений.

6.5. Когда контроль затяжки шпилек с применением безмоментного усилия не предусматривается, то высоту тарелки фланцев исходя из максимально допустимого усилия в шпильках определяют по формуле

$$h_{fw}=d_s\sqrt{(A-B)/\left(1+\frac{D_f-D}{D_w-D-s_1}-\frac{D_f}{D_w}\right)}. \quad (П10.52)$$

Если $A \leqslant B$, то высоту тарелки фланца принимают равной значению $h_f$, полученному по формулам пп. 6.1, 6.2 и 6.4 настоящего приложения. При этом вспомогательные величины $A$ для фланцев с коническим переходом и плоских фланцев и $B$ для фланцев с коническим переходом определяют по формулам

$$A = 0{,}33\left(z\frac{e_2[\sigma]_w}{e_1[\sigma]} + 0{,}7\psi\frac{pD_m^2}{[\sigma]d_s^2}\right), \qquad (П10.53)$$

где

$$\psi = \left(1-\frac{e_2}{e_1}\right)\left[\left(\frac{D+s_1}{D_m}\right)^2+1\right]+0{,}2\frac{e_2}{e_1}; \qquad (П10.54)$$

$$B = \frac{Ds_1^2}{2e_1e_2^2}\left[1+\gamma\left(\frac{s_2^2}{s_1^2}-1\right)\right] \text{ при } \gamma<1, \qquad (П10.55)$$

где

$$\gamma = \frac{2h_2}{\sqrt{D(s_2-s_1)}} \qquad (П10.56)$$

и

$$B = \frac{Ds_2^2}{2e_1d_s^2} \text{ при } \gamma \geqslant 1. \qquad (П10.57)$$

Для плоских фланцев вспомогательную величину $B$ находят по формуле

$$B = \frac{D}{2e_1}\frac{s_1^2}{e_2^2}. \qquad (П10.58)$$

Для проверки высоты опорного бурта пользуются формулами (П10.52), (П10.53) и (П10.58), в которых необходимо заменить $e_1$ на $e_6$ и $e_2$ на $e_5$.

6.6. Окончательную высоту фланца выбирают по наибольшему значению $h_f$ или $h_{fw}$, полученному по формулам пп. 6.1, 6.2, 6.4 и 6.5 настоящего приложения.

Если за окончательную высоту фланца принята $h_{fw}$, то расчет для фланца с коническим переходом необходимо повторить по формулам пп. 4, 5 и 6 настоящего приложения, пропорционально увеличив значения $s_2$ и $h_2$.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИБАВКИ К ТОЛЩИНЕ СТЕНКИ КОЛЕНА

1. Рекомендации настоящего приложения могут быть использованы, если в технических условиях на изготовление колен отсутствуют указания по определению технологической прибавки.

2. В настоящем приложении используются обозначения размеров колен, приведенные на рис. 4.5 Норм. Формулы для определения толщин стенок $s$, $s_{R_1}$, $s_{R_2}$, $s_{R_3}$ приведены в п. 4.2.2.3 Норм.

3. Для гибов, изготовляемых на трубогибочном оборудовании методом наматывания на сектор, технологическая прибавка $c_{12}$ принимается только к толщине стенки $s_{R_1}$:

для труб поверхностей нагрева

$$c_{12}=\left(\frac{1}{1+2{,}5R_s/D_a}\right)s;$$

для остальных труб

$$c_{12}=\left(\frac{1}{1+2R_s/D_a}\right)s.$$

4. Для штампованных колен, изготовляемых в закрытых штампах, или гибов, изготовляемых на станках с нагревом токами высокой частоты и осевым поджатием, технологическая прибавка принимается только к толщине стенки $s_{R_1}$:

$$0{,}05s\leqslant c_{12}\leqslant 0{,}1s.$$

5. Для колен, изготовляемых на рогообразных сердечниках, принимают $c_{12}=0$.

6. Для секторных колен считают $c_{12}=0$.

7. Для штампосварных колен с расположением двух продольных сварных швов по внутренней и внешней сторонам колена технологическая прибавка принимается только к толщине стенки $s_{R_2}$:

$$0{,}05s\leqslant c_{12}\leqslant 0{,}1s.$$

8. Для штампосварных колен с расположением сварного шва в нейтральной зоне колена технологическая прибавка принимается только к толщине стенки $s_{R_3}$:

$$0{,}05s\leqslant c_{12}\leqslant 0{,}1s.$$

9. Если определение прибавки $c_{12}$ проводится до окончательного выбора номинальной толщины стенки колена, то рекомендуется ориентировочно значение номинальной толщины стенки колена принять равным, например, значению номинальной толщины стенки прямой трубы с последующим уточнением по окончательно выбранному значению номинальной толщины стенки колена.

*ПРИЛОЖЕНИЕ 12*
(рекомендуемое)

## УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Метод расчета применим к оборудованию и трубопроводам групп В и С.

1.2. Метод расчета применим к оборудованию и трубопроводам по п. 1.1, удовлетворяющим условиям нижеследующих пунктов.

1.3. Расчетная температура стенок оборудования и трубопроводов не выходит за пределы, указанные в разд. 3.2 Норм для соответствующих материалов.

1.4. Оборудование и трубопроводы удовлетворяют условиям статической прочности и устойчивости согласно настоящим Нормам.

1.5. Метод расчета не распространяется на случай наложения на низкочастотное эксплуатационное нагружение высокочастотного от вибраций и пульсаций температур рабочей среды и ограничивается циклическим нагружением с числом циклов заданной амплитуды не более $10^6$ за время эксплуатации.

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕПАДОВ ТЕМПЕРАТУР, НАПРЯЖЕНИЙ И ЧИСЛА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ

2.1. Расчет проводят для зон оборудования и трубопроводов, где вследствие концентраторов напряжений (отверстия, изменения толщины стенки, галтели, проточки, резьба и т. п.), приложения сосредоточенных нагрузок, краевого эффекта, соединения сталей с различными модулями упругости $E_1^T$, $E_2^T$ и температурными коэффициентами расширения $\alpha_1^T$, $\alpha_2^T$, перепада температур возникают повышенные циклические местные напряжения.

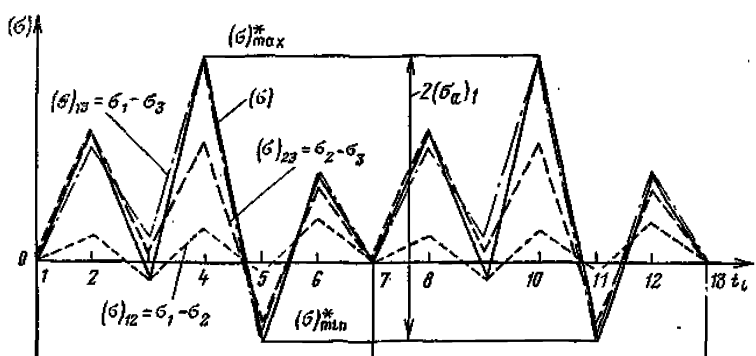



Рис. П12.1. График изменения напряжения (σ)

2.2. На первом этапе получают график изменения напряжения (σ), используя зависимости $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$ для рассматриваемой зоны элемента конструкции, полученные по п. 5.3.4 Норм (рис. П12.1) для заданных нагрузок и эксплуатационных режимов.

2.3. Из трех зависимостей $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$ находят обобщенную зависимость последовательных полуциклов приведенных напряжений, в предельных точках которых достигаются абсолютно наибольшие (наименьшие) значения напряжений из трех указанных выше зависимостей.

Обобщенная зависимость включает все моменты времени $t_l$ $(1 \leqslant l \leqslant m)$, где хотя бы одно из напряжений $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{jk}$, $(\sigma)_{ik}$ достигает экстремального значения, и имеет в каждый из этих моментов экстремум $(\sigma) = \max \{|(\sigma)_{ij}|, |(\sigma)_{jk}|, |(\sigma)_{ik}|\}$ с соответствующим знаком. В начальный $(l=1)$ и конечный $(l=m)$ моменты напряжение (σ) может принимать, в частности, значения, равные нулю.

2.4. Из полученной по п. 2.3 настоящего приложения обобщенной зависимости выделяют цикл напряжений с наибольшей амплитудой:

$$(\sigma_a)_1 = 0{,}5\left[(\sigma)^*_{\max} - (\sigma)^*_{\min}\right], \qquad (П12.1)$$

где $(\sigma)^*_{\max}$, $(\sigma)^*_{\min}$ — алгебраически наибольшее и наименьшее приведенные напряжения.

2.5. Другие типы циклов с меньшими амплитудами напряжений $(\sigma_a)_l$ выделяют из оставшейся части обобщенной зависимости, руководствуясь формулой (П12.1), и получают $0{,}5\,(m-1)$ типов циклов.

2.6. Амплитуду приведенного местного условного упругого напряжения в $i$-м цикле находят по формуле

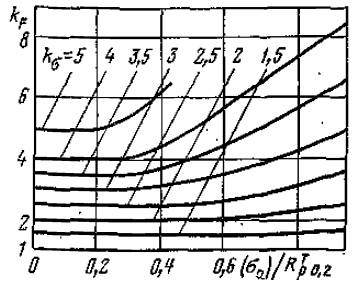
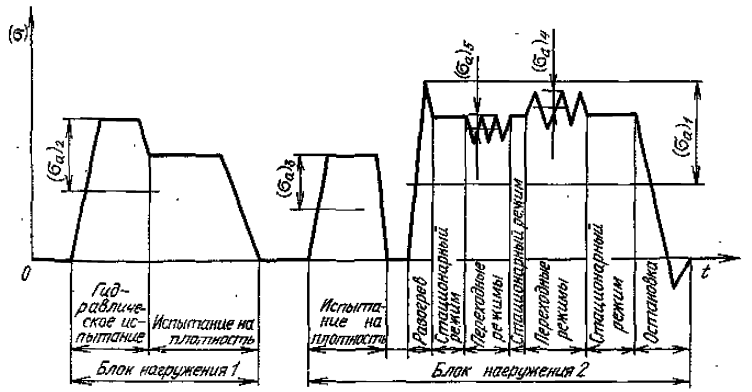



Рис. П12.2. Коэффициенты концентрации напряжений

Рис. П12.3. Пример составления блоков нагружения и график изменения приведенного напряжения в зоне концентрации (σ)




$$(\sigma_{aF}) = K_{F.i}(\sigma_a)_i(\varphi_s)^{-1}, \qquad (П12.2)$$

где $k_{F,i}$ — коэффициент концентрации напряжений в $i$-м цикле; $\varphi_s$ — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения с полным проплавлением или наплавки.

При отсутствии данных о значениях $\varphi_s$ можно принять $\varphi_s = 0{,}6$, а при отсутствии сварного шва $\varphi_s = 1$.

2.7. Коэффициенты концентрации $K_{F,i}$ определяют по формуле

$$K_F = R^T_{p0,2}\left(1+0{,}5\left\{\left[\frac{K_\sigma(\sigma_a)}{R^T_{p0,2}}\right]^2-1\right\}\right)\Big/(\sigma_a) \qquad (П12.3)$$

или по рис. П12.2 в зависимости от отношения $(\sigma_a)_i/R^T_{p0,2}$, где $R^T_{p0,2}$ — предел текучести материала при расчетной температуре; $K_\sigma$ — теоретический коэффициент концентрации напряжений, определяемый по справочникам и принимаемый равным наибольшему значению по направлению кольцевых и меридиональных напряжений при осевом растяжении.

Для метрических резьб принимают $K_\sigma = 5$. Для сварных аустенитных швов с неполным проплавлением $K_{F,i} = 6$.

Коэффициент $K_{F,i}$ для упрощения расчета можно принять одинаковым для всех типов циклов независимо от значения амплитуды и равным его значению для типа цикла с максимальной амплитудой.

2.8. При отсутствии данных по п. 2.3 настоящего приложения зависимость приведенных напряжений можно получить следующим образом.

2.8.1. Приведенные напряжения ($\sigma$) в рассматриваемой зоне определяются для физически осуществимых блоков нагружения (рис. П12.3) с включением эксплуатационных режимов нагружения, например, для сосуда с крышкой на резьбовых шпильках:

1) исходное состояние, затяг шпилек, гидравлическое испытание, испытание на плотность, снижение давления до атмосферного, исходное состояние;

2) исходное состояние, затяг шпилек, испытание плотности, разогрев, стационарный режим, переходные режимы (для нормальных условий эксплуатации и нарушения нормальных условий), стационарный режим, остановка, снижение давления до атмосферного, исходное состояние.

2.8.2. Амплитуда напряжения $(\sigma_a)_i$ полуцикла в $i$-м переходном режиме или сочетании режимов определяется по формуле

$$(\sigma_a)_i = [\sigma]\frac{\Delta p_i}{2p} + 0{,}5\,(\Delta\sigma_{me})_i + \\ + 0{,}35\,(E^T\alpha^T\Delta T_{s,i} + |E_1^T\alpha_1^T - E_2^T\alpha_2^T|\,\Delta T_{\alpha,i}), \qquad (П12.4)$$

где $p$ — расчетное давление; $\Delta p_i$ — размах изменения давления в интервале между моментами времени $t_1$ и $t_2$; $(\Delta\sigma_{me})_i$ — изменение приведенного напряжения, вызываемое изменением механических (компенсационных) нагрузок $\Delta F_{me_i}$ в интервале между моментами времени $t_1$ и $t_2$; $\Delta T_{s,i} = |\Delta T_{s,t_1} - \Delta T_{s,t_2}|$ — разность температурных перепадов по толщине стенки или средних температур в двух соседних сечениях элемента конструкции, перпендикулярных средней поверхности, в моменты времени $t_1$ и $t_2$; $\Delta T_{\alpha,i} = |\Delta T_{\alpha,t_1} - \Delta T_{\alpha,t_2}|$ — разность средних по толщине стенки температур в месте соединения разнородных сталей со свойствами $E_1^T$, $\alpha_1^T$ и $E_2^T$, $\alpha_2^T$ в моменты времени $t_1$ и $t_2$.

Соседними считаются сечения, расстояние между которыми меньше $2\sqrt{R_s s}$, где $R_s$ — среднее значение радиусов кривизны по середине толщины стенки; $s$ — средняя толщина стенки в соседних точках сосуда, патрубка, фланца или других элементов.

Перепады температур $\Delta T_{s,i}$ и $\Delta T_{\alpha,i}$, размах $(\Delta\sigma_{me})_i$, изменение $\Delta p$ определяют в такие моменты времени $i$-го режима или сочетания режимов, когда приведенное напряжение ($\sigma$) дости-

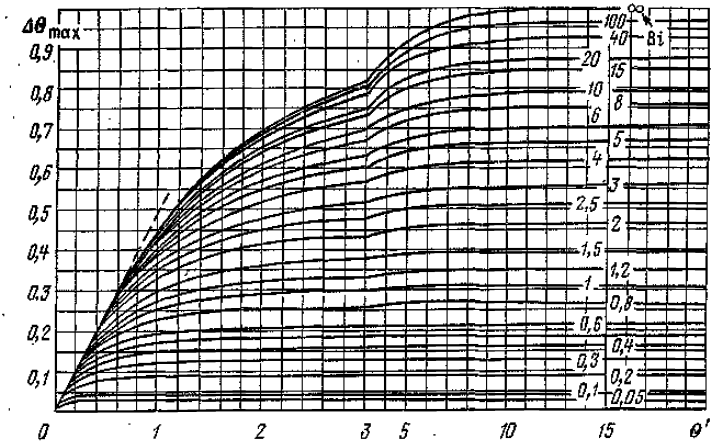



Рис. П12.4. Зависимости для определения максимального перепада температур в стенке

гает экстремальных значений. При этом следует учитывать знаки напряжений от давления, механических нагрузок и перепадов температур в указанные моменты времени, в противном случае проводится суммирование абсолютных значений напряжений.

Для получения наибольших амплитуд напряжений следует рассматривать такое сочетание режимов, в котором изменения давления, механических нагрузок, температур вызывают в рассматриваемой зоне минимальные и максимальные напряжения, например действие наружного избыточного давления, а затем внутреннего; разогрева, а затем расхолаживания; знакопеременное действие механических нагрузок. Если в рассматриваемом полуцикле какая-либо нагрузка не изменяется, то соответствующие значения $\Delta p_i$, $\Delta F_{me,i}$, $\Delta T_{s,i}$, $\Delta T_{\alpha,i}$ в формуле (П12.4) принимают равными нулю. Полученная зависимость изменения напряжений в блоке не должна иметь разрывов по напряжениям.

2.8.3. Перепад температур $\Delta T_{\max}$ (°С) в стенке толщиной $s$ (м) из материала с коэффициентами теплопроводности $\lambda$ [Вт/(м² · °С)] и температуропроводности $a$ (м²/с) при одностороннем нагреве (охлаждении) рабочей средой в интервале температур от $T_0$ до $T_к$ за время $t_k$ (с) можно определить по рис. П12.4., где $\theta = \dfrac{s^2}{at_k}$ — безразмерная скорость изменения температуры среды; $\Delta\theta_{\max} = \Delta T_{\max}/(T_к - T_0)$ — безразмерный перепад

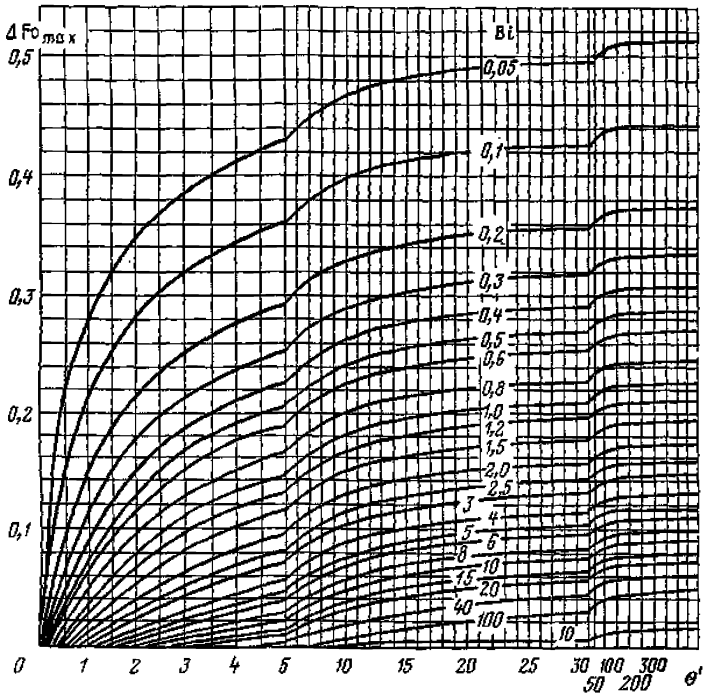



Рис. П12.5. Зависимости для определения времени достижения максимального перепада температур в стенке

температур в стенке; $Bi=\alpha s/\lambda$ — критерий Био; $\alpha$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м$^2\cdot$°С).

Перепад температур

$$\Delta T_{max}=\Delta\theta_{max}(T_k-T_0). \qquad (П12.5)$$

Время $t_{max}$ достижения максимального перепада температур $\Delta T_{max}$ в стенке можно определить с использованием рис. П12.5 по формуле

$$t_{max}=\Delta Fo_{max}s^2/a+t_k, \qquad (П12.6)$$

где $\Delta Fo_{max}$ — разность значений критериев Фурье в моменты времени $t_{max}$ и $t_k$.

2.8.4. Амплитуды приведенного местного условного упругого напряжения $(\sigma_{aF})_i$ находят по формуле (П12.2), используя указания пп. 2.4—2.7 настоящего приложения.

2.8.5. При отсутствии данных о коэффициентах $K_\sigma$ амплитуды напряжений $(\sigma_{aF})_i$ в оборудовании и трубопроводах можно определять по формуле

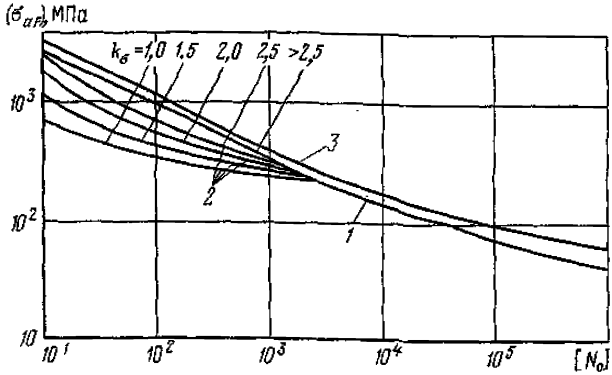



Рис. П12.6. Расчетные кривые усталости:
*1* — для углеродистых, легированных (до 360° С) и аустенитных (до 450° С) сталей ($R_m^T \geqslant 400$ МПа; $z^T \geqslant 45\%$; $E^T \geqslant 180$ ГПа; $R_{p0,2}^T / R_m^T < 0{,}7$); *1, 2* — для легированных сталей при $R_{p0,2}^T / R_m^T \geqslant 0{,}7$ ($R_m^T \geqslant 400$ МПа; $z^T \geqslant 45\%$; $E^T \geqslant 195$ ГПа); *3* — для резьбовых элементов из легированных сталей (до 360° С) ($R_m^T \geqslant 650$ МПа; $E^T \geqslant 195$ ГПа; $z^T \geqslant 40\%$)

$$(\sigma_{aF}) = \left\{ 3\left[ [\sigma] \frac{\Delta p_i}{p} + (\Delta\sigma_{me})_i \right] + 2\left( E^T \alpha^T \Delta T_{s,i} + | E_1^T \alpha_1^T - \right.\right.$$

$$\left.\left. - E_2^T \alpha_2^T | \Delta T_{\alpha,i} \right) \right\} (\overline{\varphi}_k)^{-1}. \qquad (П12.7)$$

Все указания к формуле (П12.4) распространяются на формулу (П12.7). Формула (П12.7) применима для зон концентрации и сварных швов с полным проплавлением.

2.9. Устанавливают число циклов $N_i$, соответствующее каждому значению амплитуды, за время эксплуатации исходя из данных о повторности режимов работы и нагружения.

## 3. ПРОВЕРКА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

3.1. Циклическую прочность проверяют по кривым усталости (рис. П12.6).

*При температуре $T$, ниже максимального значения* для соответствующей кривой усталости на рис. П12.6, амплитуду напряжений $[\sigma_{aF}]$ при определении числа циклов следует умножить на отношение $E^{360°\,C}/E^T$ для углеродистых и легированных сталей и $E^{450\,°C}/E^T$ — для аустенитных.

3.2. Условие прочности проверяется по формуле

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{[N_0]_i} \leqslant [a_N], \qquad (П12.8)$$

где $N_i$ — число циклов $i$-го типа за время эксплуатации; $[N_0]_i$ — допускаемое число циклов $i$-го типа (принимается по п. 3.1); $k$ — общее число типов циклов; $[a_N]$ — накопленное усталостное повреждение, предельное значение которого равно 0,4 для оборудования и трубопроводов группы Б и 1,0 — для группы В.

Различные типы циклов допускается объединить и свести к одному расчетному циклу. Число расчетных циклов равно сумме чисел объединенных циклов. Допускаемое число расчетных циклов $[N_0]$ соответствует максимальной амплитуде $(\sigma_{aF})$ из объединенных типов циклов.

Типы циклов нагружения с амплитудой напряжений, меньшей чем амплитуда напряжений по кривой усталости на рис. П12.6, при $[N_0]=10^6$ не учитывают, если их число не превышает $10^5$.

Нормативно-производственное издание

**НОРМЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Редактор *О. М. Малявина*
Художественный редактор *Б. Н. Тумин*
Технический редактор *Т. Ю. Андреева*
Корректор *Л. С. Тимохова*
ИБ 2401

Сдано в набор 01.12.88. Подписано в печать 10.05.89. Т-10903 Формат $60\times88^{1}/_{16}$. Бумага офсетная № 2 Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 32,34 Усл. кр-отт. 32,34 Уч.-изд. л. 33,48 Тираж 15 000 экз. Заказ 629 Цена 2 р. 10 к.

Энергоатомиздат. 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени «Первая Образцовая типография» Государственного комитета СССР по печати. 113054, Москва, Валовая, 28.

gost.e-ecolog.ru