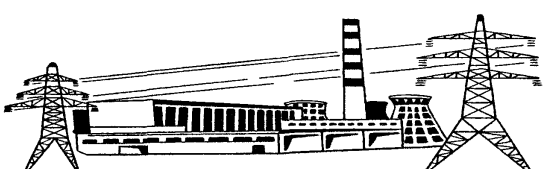
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ЖАРОПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛА КОТЛОВ, ТУРБИН И ТРУБОПРОВОДОВ



Москва 2004

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕРЖДЕНО
Приказом
Минэнерго России
от 30 июня 2003 г. № 271

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ЖАРОПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛА КОТЛОВ, ТУРБИН И ТРУБОПРОВОДОВ

© ЦПТИ ОРГРЭС, 2004

Вводится в действие
с 30 июня 2003 г.

Настоящие Методические указания (СО 153-34.17.471-2003) распространяются на стали и сплавы для энергомашиностроения и энергетики, которые предназначены для изготовления оборудования, работающего при температуре более 115°С или избыточном давлении пара или воды более 7 МПа. Характеристики жаропрочности определяются для сталей и сплавов, длительно работающих при температуре более 400°С.

Методические указания устанавливают единые планы испытаний, а также методы обработки полученных данных с целью определения характеристик жаропрочности сталей (сплавов), применяемых в энергомашиностроении и энергетике.

Характеристики жаропрочности предназначены для:

— расчетов на прочность деталей котлов, турбин и трубопроводов;

— оценки жаропрочности вновь разрабатываемой марки стали или сплава;

— оценки жаропрочности отдельных партий металла или металла изделий после технологических операций;

— оценки жаропрочности и долговечности металла элементов котлов, турбин и трубопроводов в процессе их эксплуатации;

— оценки жаропрочности металла при проведении научно-исследовательских работ.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Условные обозначения:

t – температура, °С;

$t_м$ – расчетная температура металла, °С;

$\tau_з$ – заданный ресурс, ч;

$\tau_р$ – время равномерного удлинения, ч;

σ – номинальное напряжение, МПа;

δ – остаточное удлинение, %;

$\delta_р$ – равномерное остаточное удлинение при времени $\tau_р$, %;

$\delta_к$ – остаточное удлинение после разрушения образца, %;

$\delta_з$ – заданное остаточное удлинение при ресурсе $\tau_з$, %;

ψ – остаточное сужение, %;

$\psi_р$ – равномерное остаточное сужение при времени $\tau_р$, %;

$\psi_к$ – остаточное сужение после разрушения образца, %;

$\bar{\delta}_i = \frac{1}{\tau_i}\int_0^{\tau_i}\delta_i(\tau)\,d\tau$ – средняя деформация в текущей точке i кривой ползучести;

$\bar{\delta}_к = \frac{1}{\tau_к}\int_0^{\tau_к}\delta_к(\tau)\,d\tau$ – средняя деформация при разрушении образца;

$\sigma^t_{д\,п,\tau_з}$ – условный предел длительной прочности (значение напряжения, вызывающее разрушение при температуре t и заданном ресурсе $\tau_з$), МПа;

$\sigma^t_{п-\delta_з,\tau_з}$ – условный предел ползучести (значение напряжения, при котором остаточное удлинение достигает заданного значения $\delta_з$ при температуре t и заданном ресурсе $\tau_з$), МПа;

$\sigma^t_{рк,\tau_з}$ – релаксационная стойкость (значение остаточного напряжения, до которого понижается начальное упругое напряжение σ за заданный ресурс $\tau_з$ при температуре t), МПа;

$\delta^t_{к,\tau_з}$ – условный предел остаточного удлинения (значение остаточного удлинения при температуре t и заданном ресурсе $\tau_з$), %;

$\psi^t_{к,\tau_з}$ – условный предел остаточного сужения (значение остаточного сужения при температуре t и заданном ресурсе $\tau_з$), %;

$\delta^t_{р,\tau_р}$ – условный предел равномерного остаточного удлинения (значение равномерного остаточного удлинения при температуре t и времени равномерной деформации $\tau_р$), %;

$\psi^t_{р,\tau_р}$ – условный предел равномерного остаточного сужения (значение равномерного остаточного сужения при температуре t и времени равномерной деформации $\tau_р$), %;

$\left(\sigma^t_{д.п,\tau_з}\right)^л$; $\left(\sigma^t_{п-\delta_з,\tau_з}\right)^л$; $\left(\sigma^t_{рк,\tau_з}\right)^л$; $\left(\delta^t_{к,\tau_з}\right)^л$; $\left(\psi^t_{к,\tau_з}\right)^л$; $\left(\delta^t_{р,\tau_р}\right)^л$; $\left(\psi^t_{р,\tau_р}\right)^л$ – лабораторные характеристики жаропрочности, МПа, %;

$\left(\sigma^t_{д.п,\tau_з}\right)^п$; $\left(\sigma^t_{п-\delta_з,\tau_з}\right)^п$; $\left(\sigma^t_{рк,\tau_з}\right)^п$; $\left(\delta^t_{к,\tau_з}\right)^п$; $\left(\psi^t_{к,\tau_з}\right)^п$; $\left(\delta^t_{р,\tau_р}\right)^п$; $\left(\psi^t_{р,\tau_р}\right)^п$ – первичные характеристики жаропрочности, МПа, %;

$\left(\sigma^t_{д.п,\tau_з}\right)$; $\left(\sigma^t_{п-\delta_з,\tau_з}\right)$; $\left(\sigma^t_{рк,\tau_з}\right)$; $\left(\delta^t_{к,\tau_з}\right)$; $\left(\psi^t_{к,\tau_з}\right)$; $\left(\delta^t_{р,\tau_р}\right)$; $\left(\psi^t_{р,\tau_р}\right)$ – предварительные нормативные характеристики жаропрочности, МПа, %;

$\sigma^t_{д.п,\tau_з}$; $\sigma^t_{п-\delta_з,\tau_з}$; $\sigma^t_{рк,\tau_з}$; $\delta^t_{к,\tau_з}$; $\psi^t_{к,\tau_з}$; $\delta^t_{р,\tau_р}$; $\psi^t_{р,\tau_р}$ – нормативные характеристики жаропрочности, МПа, %.

1.2 Определения

1.2.1 Лабораторная партия стали (сплава) – металл одной плавки, изготовленный во внепромышленных условиях, термообработанный по одному режиму, механические свойства которого по пределам прочности и текучести при температуре 20°С различаются не более чем на ±50 МПа. Химический состав и механические свойства металла, а

также режимы термообработки должны соответствовать выходным данным стали (сплава).

1.2.2 Опытно-промышленная партия стали (сплава) — металл одной плавки, изготовленный в промышленных условиях в процессе его внедрения в производство, химический состав, механические свойства, а также режим термообработки которого соответствуют требованиям временных технических условий на трубы, отливки, поковки и другие полуфабрикаты для энергомашиностроения.

1.2.3 Промышленная партия стали (сплава) — металл одной плавки, изготовленный в промышленных условиях, химический состав и механические свойства, а также режим термообработки которого соответствуют требованиям технических условий на трубы, отливки, поковки и другие полуфабрикаты для энергомашиностроения.

1.2.4 Марка стали (сплава) — металл промышленных партий, взятых от разных плавок:

— для крупногабаритных изделий единичного производства (корпуса, ротора турбины и пр.) — не менее 6 партий;

— для крупносерийного производства — не менее 10 партий.

Рекомендуется в число этих партий включать партии с содержанием углерода и легирующих элементов на верхнем и нижнем пределах, оговоренных в технических условиях, а также металл изделий после окончательных технологических операций.

1.2.5 Изделие — деталь котла, турбины или трубопровода, изготовленная из металла, химический состав и механические свойства которого отвечают требованиям действующих нормативных документов (НД) или технических условий. Металл изделия должен соответствовать марке стали (сплава), разрешенной Правилами Госгортехнадзора России для данных условий эксплуатации.

1.2.6 Заданный ресурс — время, для которого определяются характеристики жаропрочности стали (сплава) или расчетный срок эксплуатации изделия.

1.2.7 Дополнительный ресурс — дополнительное время к заданному ресурсу, для которого можно определить характеристики жаропрочности стали (сплава) на основании проведенных испытаний при определении характеристик на заданный ресурс или срок дополнительной безаварийной эксплуатации детали котла, турбины или трубопровода.

1.2.8 Характеристики жаропрочности — характеристики прочности стали (сплава) при повышенных температурах, к которым относятся: условный предел длительной прочности $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$; условный предел ползучести $\sigma^t_{п-\delta_э,\tau_э}$; релаксационная стойкость $\sigma^t_{рк,\tau_э}$ и параметры длительной пластичности: условный предел остаточного удлинения $\delta^t_{к,\tau_э}$, условный предел остаточного сужения $\psi^t_{к,\tau_э}$, условный предел равномерного остаточного удлинения $\delta^t_{р,\tau_р}$, условный предел равномерного остаточного сужения $\psi^t_{р,\tau_р}$.

1.2.9 В комплекс обязательных для определения характеристик стали (сплава) входят: пределы прочности, текучести, удлинения и сужения при температуре 20°С и расчетной температуре; условные пределы длительной прочности $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$, ползучести $\sigma^t_{п-\delta_э,\tau_э}$, остаточного удлинения $\delta^t_{к,\tau_э}$, остаточного сужения $\psi^t_{к,\tau_э}$, равномерного остаточного удлинения $\delta^t_{р,\tau_р}$ и равномерного остаточного сужения $\psi^t_{р,\tau_р}$, а для материалов, предназначенных для крепежных изделий и трубопроводов — релаксационная стойкость $\sigma^t_{рк,\tau_э}$.

Для каждой определяемой характеристики должны быть приведены значения дисперсии.

1.2.10 К категории лабораторных характеристик жаропрочности стали (сплава) относятся характеристики, определенные на металле лабораторных партий.

1.2.11 К категории первичных характеристик жаропрочности стали (сплава) относятся характеристики, определенные на металле опытно-промышленных партий.

1.2.12 К категории предварительных нормативных характеристик стали (сплава) относятся характеристики, определенные на металле первых промышленных партий.

1.2.13 К категории нормативных характеристик относятся характеристики, определенные на количестве промышленных партий, представляющих марку стали (сплава).

1.2.14 Планируемые испытания — испытания стали (сплава) на жаропрочность, проведенные по планам, предусмотренным настоящими Методическими указаниями.

1.2.15 Произвольные испытания — испытания партии стали (сплава) на жаропрочность, проведенные по планам испытаний, отличных от предусмотренных настоящими Методическими указаниями.

1.2.16 Аналитический метод обработки данных планируемых испытаний на жаропрочность основан на использовании компьютера и позволяет определить все характеристики жаропрочности.

1.2.17 Аналитический метод обработки данных произвольных испытаний на жаропрочность основан на использовании компьютера и позволяет с помощью базовых диаграмм определить условные пределы длительной прочности, ползучести, остаточного удлинения и остаточного сужения для марки стали или сплава.

1.2.18 При использовании аналитических методов обработки данных испытаний на жаропрочность точность определения условных пределов длительной прочности, указанная в пунктах 3.3.3; 5.3; 10.4 и 10.5 настоящих Методических указаний, обеспечена отсутствием экстраполяции по напряжениям.

Точность определения нормативных или предварительных нормативных характеристик для марки стали (сплава), кроме ошибки собственно методов определения жаропрочных и механических свойств, зависит от величины доверительного интервала, определенного объемом выборки и дисперсией оцениваемой характеристики.

1.2.19 Оценка жаропрочности стали (сплава) в исходном состоянии, после окончательных технологических операций и при эксплуатации основана на сопоставлении данных испытаний на длительную прочность отдельных партий металла или металла изделий с нормативными характеристиками марки стали (сплава).

1.2.20 Ускоренный метод оценки жаропрочных свойств стали (сплава) или металла изделий основан на качественном сопоставлении данных испытаний на жаропрочность с нормативными характеристиками марки стали (сплава).

1.3 Область применения

1.3.1 Комплекс лабораторных характеристик жаропрочности стали (сплава) используется в качестве заявочного для характеристики свойств новой марки стали (сплава) и применяется для предварительных прочностных расчетов при ее опытном эксплуатационном опробовании.

Допустимо использование комплекса лабораторных характеристик во временных технических условиях на изготовление как самой марки стали (сплава), так и изделий из нее.

1.3.2 Комплекс первичных характеристик жаропрочности стали (сплава) используется при отработке технологии изготовления металла в промышленных условиях, составлении временных технических условий и для предварительных прочностных расчетов при опытном эксплуатационном опробовании металла или изделий из него.

1.3.3 Комплекс предварительных нормативных характеристик стали (сплава) используется при составлении технических условий на изготовление как самой марки стали (сплава), так и изделий из нее, а также при прочностных расчетах промышленных изделий. Значения $\left(\sigma^{t}_{д.п,\tau_э}\right)$ и $\left(\sigma^{t}_{п-\delta_1,\tau_э}\right)$ должны быть уменьшены при этом на 10%. Для крупногабаритных изделий (корпуса, ротора турбины и пр.) единичного производства допустимо помещать комплекс

предварительных нормативных характеристик стали (сплава) в НД и справочники с соответствующим указанием их категории и уменьшением значений $\left(\sigma^t_{д.п,\tau_э}\right)$ и $\left(\sigma^t_{п-\delta_э,\tau_э}\right)$ на 20%.

1.3.4 Комплекс нормативных характеристик определяет прочностные свойства марки стали (сплава), используется в технических условиях в качестве гарантированных значений жаропрочности, помещается в НД и справочники, по нему проводятся массовые прочностные расчеты промышленных изделий.

1.3.5 Оценка жаропрочных свойств стали (сплава) производится с целью отбраковки партий металла в исходном состоянии, а также металла отдельных изделий после окончательных технологических операций при их изготовлении. Объем проверяемых партий металла и количество изделий регламентируются специальными документами.

1.3.6 Оценка жаропрочности металла изделий при эксплуатации производится с целью определения дополнительного ресурса (времени дальнейшей безаварийной эксплуатации).

1.4 Характеристики релаксационной стойкости стали (сплава) определяются согласно действующим НД. Рекомендуется использовать расчетный метод, изложенный в настоящих Методических указаниях.

1.5 Предварительные нормативные и нормативные характеристики жаропрочности стали (сплава) в объеме, предусмотренном пунктом 1.2.9 настоящих Методических указаний, определяются организацией – разработчиком металла.

1.6 Все первичные данные по результатам испытаний стали (сплава) на жаропрочность, а также все материалы по их обработке хранятся у организации – разработчика материала.

1.7 Лабораторные и нормативные характеристики стали (сплава) для энергомашиностроения, а также предварительные характеристики для крупногабаритных изделий единичного производства согласовываются в установленном порядке.

1.8 Для каждой категории характеристик стали или сплава (лабораторных, первичных, предварительных нормативных, нормативных) рекомендуется определять температурные зависимости механических свойств металла (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение) в интервале температур 20°С – $t_м$.

1.9 Рекомендуется для всех сталей (сплавов) строить изохронные кривые ползучести.

1.10 Для ответственных изделий производится расчет на прочность с учетом реального сложнонапряженного состояния.

1.11 При научно-исследовательских работах, связанных с изучением металла и выбором композиций сталей (сплавов), могут проводиться испытания по другим планам, отличным от указанных в настоящих Методических указаниях.

1.12 Программы для расчетов характеристик жаропрочности находятся в ЦНИИТМАШ.

Перечень программ представлен в приложении Б.

1.13 Все данные испытаний, результаты их обработки и значения характеристик жаропрочности рекомендуется представлять в унифицированном виде. Формы таблиц и диаграмм даны в приложении В.

2 ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

2.1 Условные обозначения:

$\sigma_в^t$ – предел прочности при температуре t, МПа;

$\delta_н^c$ – суммарное удлинение при нагружении, %;

$\delta_н^y = \frac{\sigma}{E_т}$ – упругое удлинение при нагружении ($E_т$ – модуль нормальной упругости металла при температуре испытания, МПа), %;

$\delta_н = \delta_н^c - \delta_н^y$ – остаточное удлинение при нагружении, %;

$\delta^c_в$ — суммарное удлинение во время испытаний, %;

$\delta_в = \delta^c_в - \delta^y_н$ — остаточное удлинение во время испытаний, %;

$\delta^п_в = \delta^c_в - \delta^c_н$ — деформация ползучести, %;

$\tau_в$ — время измерения удлинения, ч;

$\tau_{\delta_з}$ — время, соответствующее заданному остаточному удлинению $\delta_з$, ч;

$\tau_к$ — время до разрушения, ч;

t_i, σ_i, $\tau_{к_i}$, $\sigma^{t_i}_в$, $\delta^c_{н_i}$, $\delta^y_{н_i}$, $\delta_{н_i}$, $\delta^c_{в_i}$, $\delta_{в_i}$, $\delta^п_{в_i}$, $\tau_{в_i}$ — параметры i-го испытания.

Остальные условные обозначения — согласно разделу 1.1.

2.2 Все испытания на жаропрочность проводятся согласно действующим государственным стандартам.

2.3 Образцы для испытаний каждой партии стали (сплава) изготавливаются из металла, механические свойства которого по пределам прочности и текучести при температуре 20°С различаются не более чем на ±50 МПа.

2.4 При каждом режиме испытывается не менее двух параллельных образцов. Если времена до разрушения параллельных образцов при любом режиме различаются между собой более чем в 2 раза, то проводятся дополнительные испытания на двух образцах при том же режиме.

При обработке учитываются все результаты, полученные при основных и дополнительных испытаниях.

2.5 Испытания на жаропрочность проводятся при температурах из следующего ряда:

— для углеродистых и малолегированных сталей — 400; 425; 450; 475; 500; 525 и 550°С;

— для среднелегированных сталей — 400; 425; 450; 475; 500; 525; 550; 575; 600; 625 и 650°С;

— для аустенитных и высокохромистых сталей — 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750 и 800°С;

— для сплавов — 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1050 и 1100°С.

2.6 При испытаниях на жаропрочность температура испытаний t_1 должна соответствовать ближайшей по отношению к температуре $t_м$ из ряда, указанного в пункте 2.5 ($t_1 \cong t_м$).

2.7 Допустимо проводить испытания при большем числе режимов и большем времени до разрушения, чем указано в настоящем разделе.

2.8 План полных испытаний

2.8.1 Испытания должны быть проведены по режимам (напряжение, температура):

σ_1, σ_2 и σ_3 при $t_1 \cong t_м$;

σ_4, σ_5 и σ_6 при $t_2 > t_1$.

Значения t_2 и t_1 принимаются согласно пункту 2.5.

2.8.2 Среднее время до разрушения $\tau_к$ должно быть не менее:

0,005 $\tau_з$ для σ_1;

0,020 $\tau_з$ для σ_2;

0,060 $\tau_з$ для σ_3;

0,003 $\tau_з$ для σ_4;

0,010 $\tau_з$ для σ_5;

0,050 $\tau_з$ для σ_6.

Разница между значениями напряжений испытаний σ_1 должна составлять не менее 10%.

При выборе значений напряжений σ_1 и σ_4, с которых следует начинать испытания, ориентиром может служить значение $0,6-0,8\,\sigma_в^t$.

Значения времени до разрушения, полученные при испытаниях, должны охватывать интервал не менее 1,3 порядка по логарифмической шкале времени.

2.8.3 Число испытанных образцов должно быть не менее 12.

2.8.4 Испытания проводятся с измерением деформации.

2.8.5 Результаты обрабатываются аналитическим методом для планируемых испытаний. При определении условных пределов длительной прочности и ползучести допустимо обрабатывать данные испытаний упрощенным аналитическим методом.

2.9 План длительных испытаний

2.9.1 Испытания должны быть проведены при температуре $t_1 \cong t_м$ (см. пункты 2.5 и 2.6).

2.9.2 Испытания проводятся при пяти напряжениях, причем среднее время до разрушения $\tau_к$ должно быть не менее:

0,005 $\tau_э$ для σ_1;
0,030 $\tau_э$ для σ_2;
0,070 $\tau_э$ для σ_3;
0,150 $\tau_э$ для σ_4;
0,250 $\tau_э$ для σ_5.

Указания по выбору напряжения σ_1 по разнице между значениями напряжений и значениями времени до разрушения даны в пункте 2.8.2.

2.9.3 Число испытанных образцов должно быть не менее 10.

2.9.4 Испытания для получения условного предела ползучести проводятся с измерением деформации.

2.10 План сокращенных испытаний

2.10.1 Испытания должны быть проведены по режимам (напряжение, температура):

σ_1, σ_2 и σ_3 при $t_1 \geq t_м$ (см. пункт 2.5);
σ_4, σ_5 и σ_6 при $t_2 = t_1 + 50°C$.

2.10.2 Среднее время до разрушения $\tau_к$ должно быть не менее:

0,004 $\tau_э$ для σ_1;
0,010 $\tau_э$ для σ_2;
0,015 $\tau_э$ для σ_3;
0,002 $\tau_э$ для σ_4;
0,005 $\tau_э$ для σ_5;
0,010 $\tau_э$ для σ_6.

Указания по выбору напряжений σ_1 и σ_4 по разнице между значениями напряжений и по значениям времени до разрушения даны в пункте 2.8.2.

2.10.3 Число испытанных образцов должно быть не менее 12.

2.10.4 Испытания проводятся измерением деформации.

2.10.5 Результаты обрабатываются аналитическим методом для планируемых испытаний. Допустимо определять условные пределы длительной прочности и ползучести упрощенным методом.

2.11 План оценочных испытаний

2.11.1 Испытания должны быть проведены по режимам (напряжение, температура):

σ_1 при $t_1 \geq t_м$ (см. пункт 2.5);

σ_2 при $t_2 = t_1 + 50°C$.

2.11.2 Значения напряжений выбираются по нижней границе допускаемой полосы разброса для условного предела длительной прочности нормативных характеристик марки стали (сплава) при времени до разрушения $\tau_к$, равном 300 ч.

Для сталей, приведенных в НД Госгортехнадзора России, нижняя граница строится при напряжениях, меньших нормативных на 20%.

2.11.3 Число испытанных образцов должно быть не менее 4.

2.11.4 Испытания проводятся без измерения деформации.

2.11.5 Оценка длительной прочности стали (сплава) производится по ускоренному методу.

2.12 Лабораторные характеристики жаропрочности определяются на металле трех лабораторных партий стали (сплава), каждая из которых испытывается по плану сокращенных испытаний (см. раздел 2.10 настоящих Методических указаний).

Данные испытаний каждой партии обрабатываются согласно пункту 2.10.5. Совместная обработка характеристик жаропрочности обследованных партий производится аналитическим методом для планируемых испытаний.

2.13 Первичные характеристики жаропрочности определяются на металле трех опытно-промышленных партий. План испытаний и обработка результатов такие же, как и при определении лабораторных характеристик (см. пункт 2.12).

2.14 Предварительные нормативные характеристики определяются на металле четырех первых промышленных партий стали (сплава). Допустимо проводить испытания на металле первой партии, уточняя полученные характеристики данными испытаний последующих партий.

Испытания каждой партии металла выполняются по плану полных испытаний (см. раздел 2.8 настоящих Методических указаний), а обработка данных как по отдельной партии, так и по совокупности характеристик жаропрочности обследованных партий — аналитическим методом для планируемых испытаний.

Если испытания на жаропрочность были проведены и обработаны не по настоящим Методическим указаниям, то совокупность характеристик жаропрочности партий можно обрабатывать аналитическим методом для произвольных испытаний.

2.15 Нормативные характеристики жаропрочности определяются на металле промышленных партий, представляющих марку стали или сплава (см. пункт 1.2.4).

План испытаний и обработка результатов такие же, как и при определении предварительных нормативных характеристик (см. пункт 2.14).

2.16 Испытания для оценки жаропрочных свойств отдельных партий металла в исходном состоянии и металла изделий при эксплуатации проводятся по плану сокращенных испытаний. Допускается проведение испытаний без измерения деформации.

2.17 Контроль жаропрочных свойств отдельных партий металла или металла изделий после окончательных технологических операций проводится на основании результатов испытаний по оценочному плану (см. раздел 2.11 настоящих Методических указаний).

2.18 По данным испытаний на жаропрочность строятся кривые деформирования (первичные кривые ползучести) в координатах $\tau - \delta$ (рисунок 1). Кривые деформирования рекомендуется получать с помощью компьютера по программам Б.1.1 и Б.1.2 приложения Б .

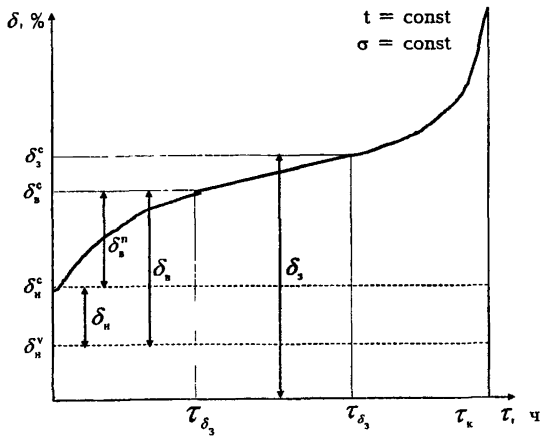


Рисунок 1 – Кривая деформирования

2.19 По кривым деформирования для каждого испытания можно определить время $\tau_{\delta_з}$, соответствующее заданному остаточному удлинению $\delta_з$ (см. рисунок 1).

2.20 В результате испытаний образцов на жаропрочность с измерением деформации должны быть получены значения:

- температуры t;
- напряжения σ;
- времени $\tau_в$ и $\tau_к$;
- удлинения $\delta_н^с$; $\delta_н^у$; $\delta_н^п$; $\delta_в^с$; $\delta_в^п$; $\delta_к$;
- сужения $\psi_к$.

2.21 Испытания для определения кратковременных механических свойств стали (сплава) проводятся на девяти образцах от каждой партии металла. Для определения характеристик стали (сплава) образцы испытываются при температурах t_1, t_2 (принимаемых по пунктам 2.8.1; 2.9.1; 2.10.1 и 2.11.1) и t_3 = 20°С.

Количество партий для определения лабораторных, первичных, предварительных нормативных и нормативных характеристик принимаются согласно пунктам 2.12; 2.13; 2.14 и 2.15 настоящих Методических указаний.

Рекомендуется для каждой партии и совокупности партий строить температурную зависимость в интервале от t_3 до t_1 на основании проведения дополнительных испытаний не менее чем при двух значениях температуры из следующего ряда:

— для углеродистых и малолегированных сталей — 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450 и 500°С;

— для среднелегированных сталей — 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550 и 600°С;

— для аустенитных и высокохромистых сталей — 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750 и 800°С;

— для сплавов — 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1050 и 1100°С.

Испытания при температурах t_1, t_2 и t_3 следует считать основными.

2.22 Результаты проведенных испытаний образцов на жаропрочность и кратковременные механические свойства стали (сплава) помещаются в таблицу 1, которая служит основанием для последующего определения необходимых характеристик.

2.23 Данные испытаний (время $\tau_в$ и удлинения $\delta_н$ и $\delta_в^c$) помещаются в таблицу Б.1 приложения Б.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов и данные их предварительной обработки

					1	Индекс карты							Лист 1
2	Марка стали (сплава)			3	Организация-испытатель			4	Категория испытания				Примечание
5	Индекс партии		6	Предприятие-изготовитель		7	Способ плавки	8	Масса партии или размеры изделия		9	Режимы термообработки	Примечание
10	Химический состав, %												
11	**Результаты механических испытаний**												
Клеймо образца	Температура испытаний t, °C	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %	Твердость по Бринеллю НВ	Балл зерна	Микро-твердость	Структура	Клеймо образца	Температура испытаний t, °C	Ударная вязкость $a_н$, Дж/м^2	Примечание
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	

Продолжение таблицы 1

						1	Индекс карты	Лист 2
25	**Результаты длительных испытаний**							
Клеймо образца	Температура испытания t, °С	Номинальное напряжение $\sigma_н$, МПа	Время до разрушения $\tau_к$, ч	Суммарное удлинение при нагружении $\delta_н^c$, %	Остаточное удлинение после разрушения $\delta_к$, %		Остаточное сужение после разрушения $\psi_к$, %	Примечание
26	27	28	29	30	31		32	

					1	Индекс карты				Лист 3
33	**Данные первичной обработки результатов длительных испытаний**									
Клеймо образца	Модуль упругости $E_т$, МПа	Упругое удлинение при нагружении $\delta_н^у$, %	Время $\tau_{\delta_э}$, соответствующее заданному удлинению $\delta_э$, ч					Время равномерной деформации $\tau_р$, ч	Равномерное остаточное удлинение $\delta_р$, %	Примечание
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	

Окончание таблицы 1

					1	Индекс карты											Лист 4	
44	**Данные первичной обработки деформации ползучести**																	
Клей-мо образ-ца	Переходная стадия деформирования		Квазиравномерная стадия деформирования		Деформация ползучести $\delta_в^п$, %													
	Отрезок времени $\Delta\tau_1$, ч	Количество отрезков $\Delta\tau_1(u_1)$	Отрезок времени $\Delta\tau_2$, ч	Количество отрезков $\Delta\tau_2(u_2)$														Приме-чание
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	

Примечания

1 В графу 1 помещается индекс карты, одинаковый для всех листов Желательно все 4 листа выполнять в виде единой карты.
2 В графы 2, 5-9 заносятся сертификатные данные металла.
3 В графе 4 указывается категория определяемой характеристики (см. пункты 1 2 10-1 2 13 настоящих Методических указаний).
4 В графу 10 заносятся поэлементно данные химического состава.
5 В разделы 11, 25, 33 и 44 таблицы 1 помещаются данные проведенных испытаний
6 В графы 19-21 заносятся данные металлографических исследований.
7 Данные для графы 35 берутся из справочников или из банка данных по материалам
8 Графы 22-24 заполняются по результатам испытаний образцов на ударную вязкость
9 В графы 26-32 помещаются результаты испытаний, проведенных по разделу 2 настоящих Методических указаний.
10 В графы 34 и 45 заносятся клейма образцов из графы 26
11 Данные графы 36 подсчитываются по формуле $\delta_n^* = \frac{\sigma}{E_t}$ (см пункт 2 1 настоящих Методических указаний)
12 В графы 37-41 заносятся данные, полученные согласно пункту 2 19 настоящих Методических указаний.
13 Данные граф 42 и 43 определяются из рисунка 3 (см пункт 3.2 2 1 настоящих Методических указаний).
14 Данные граф 46-49 определяются из рисунка 4 (см. пункт 3.2.3 2 настоящих Методических указаний).
15 В графы 50-62 помещаются данные, определенные согласно пункту 3.2.3.3 настоящих Методических указаний.
16 В графе «Примечание» приводятся дополнительные сведения, необходимые для более полной характеристики испытываемых образцов и режимов испытаний.

3 АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПЛАНИРУЕМЫХ ИСПЫТАНИЙ

3.1 Условные обозначения:

N – количество испытанных образцов;

$P_{д.п}$ – параметр длительной прочности;

$P_п$ – параметр ползучести;

$P_у$ – параметр остаточного удлинения;

$P_с$ – параметр остаточного сужения;

$P_{р.у}$ – параметр равномерного остаточного удлинения;

σ_0 – истинное напряжение испытаний, МПа;

$\sigma'_{д.п}$ – условный предел длительной прочности, определенный по параметрической диаграмме жаропрочности, МПа;

$\delta_п$ – остаточное удлинение, соответствующее окончанию переходной стадии деформирования, %;

$\tau_п$ – время, соответствующее $\delta_п$, ч;

$\Delta\tau_1$ – отрезок времени на переходной стадии деформирования, ч;

$\Delta\tau_2$ – отрезок времени на квазиравномерной стадии деформирования, ч;

u_1 – количество отрезков $\Delta\tau_1$;

u_2 – количество отрезков $\Delta\tau_2$;

a, b, c, n, r – постоянные, характеризующие свойства металла;

M – количество партий стали (сплава);

m – коэффициент;

S_b^2 и S_c^2 – дисперсии постоянных b и c соответственно;

$cov_{b,\,c}$ – ковариация постоянных b и c;

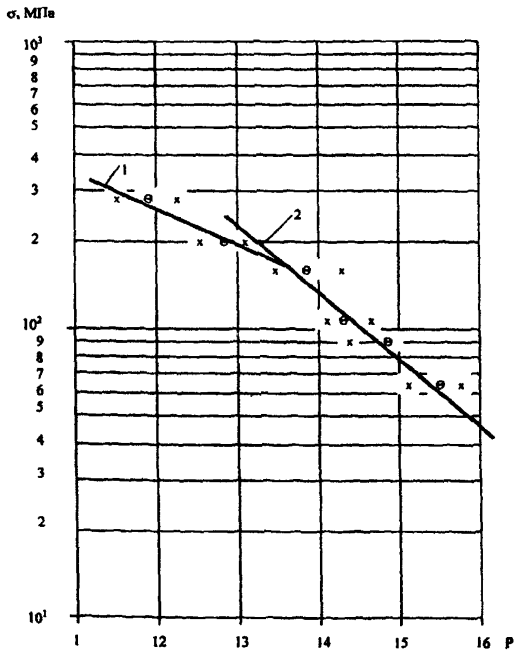
p – вероятность разрушения образцов;

Z_p – коэффициент, зависящий от величины p.

Остальные условные обозначения – согласно разделам 1.1. и 2.1 настоящих Методических указаний.

3.2 Предварительная обработка данных испытаний

3.2.1 Для оценки правильности проведения испытаний (согласно разделам 2.8 или 2.10), а также для возможности корректировки режимов в процессе испытаний строится условная параметрическая диаграмма длительной прочности в координатах $P_{Дп}$ — lgσ (рисунок 2). Расчеты ведутся по программе Б.1.6 приложения Б.



$P_{Дп} = T\,(\lg\tau_к - 2\lg T - a)\cdot 10^{-3}$

Θ — средние величины

Рисунок 2 — Условная параметрическая диаграмма длительной прочности

3.2.1.1 Значение параметра длительной прочности определяется для каждого испытания по формуле

$$P_{Дп} = T\,(\lg\tau_к - 2\lg T - a)\cdot 10^{-3}, \qquad (1)$$

где T – температура испытания, К.

При отсутствии марочных данных значение постоянной *a* принимается для углеродистых, малолегированных, среднелегированных и высоколегированных сталей минус 25, для аустенитных сталей минус 20, для сплавов минус 30.

3.2.1.2 По средним значениям параметра длительной прочности, подсчитанным для каждого уровня напряжений (σ_1, σ_2, σ_3, σ_4, σ_5, σ_6 – см. пункты 2.8.2 или 2.10.2), проводится прямая линия условной параметрической диаграммы (1 на рисунке 2).

3.2.1.3 Если по результатам испытаний, нанесенным на условную параметрическую диаграмму, можно провести две линии, то в дальнейшую обработку включаются лишь данные, лежащие на правой ее ветви.

3.2.1.4 Считается, что испытания на жаропрочность проведены правильно, если в дальнейшей обработке могут участвовать данные не менее четырех напряжений и соблюдено условие $\sigma_6 < \sigma'_{д.п}$ (см. пункты 2.8.2 и 2.10.2). В противном случае проводятся дополнительные испытания при температуре $t_3 > t_2$ (см. пункт 2.5) и напряжениях σ_7 и σ_8, среднее время до разрушения которых не должно быть менее $0{,}005\tau_з$ для σ_7 и $0{,}030\tau_з$ для σ_8.

3.2.2 Для определения значения равномерного остаточного удлинения строится кривая остаточного удлинения в координатах $\frac{\tau_в}{\tau_к} - \lg\delta_в$ (рисунок 3) для каждого режима испытаний.

3.2.2.1 По точке перелома кривой, характеризующей переход от квазиравномерного деформирования к заключительной стадии разрушения (точка Р на рисунке 3), определяется значение равномерного остаточного удлинения $\delta_р$ и соответствующее ей значение времени $\tau_р$.

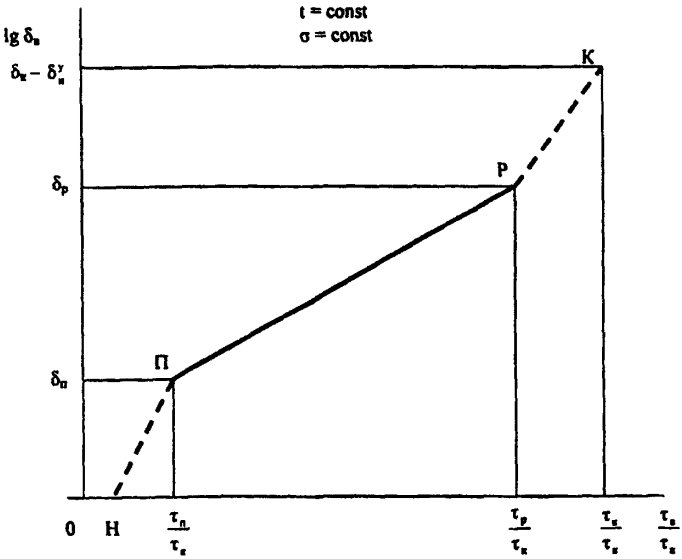


Рисунок 3 – Кривая остаточного удлинения

3.2.2.2 Значение равномерного остаточного сужения подсчитывается по формуле

$$\psi_p = \frac{\delta_p}{1+\delta_p}. \qquad (2)$$

3.2.3 Для выполнения расчетов, необходимых при построении изохронных кривых ползучести и определении релаксационной стойкости стали (сплава), строится кривая деформации ползучести в координатах $\tau - \delta_в^п$ (рисунок 4).

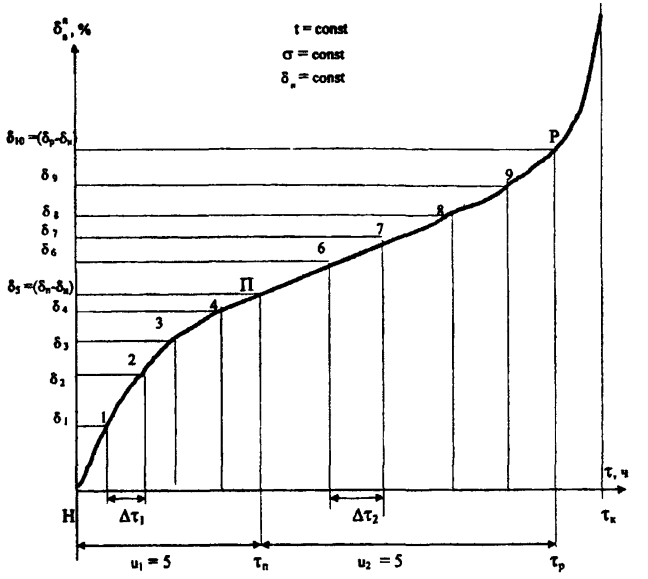


Рисунок 4 – Кривая деформации ползучести

3.2.3.1 На кривую деформации ползучести наносятся точки П и Р, соответствующие окончанию переходной и квазиравномерной стадий формирования. Координаты этих точек принимаются по кривой остаточного удлинения (см. рисунок 3).

3.2.3.2 Интервалы времени между началом испытаний и окончанием переходной стадии деформирования и между началом и окончанием квазиравномерной стадии деформирования ($\tau_п - \tau_р$) разбиваются на равные отрезки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ соответственно (см. рисунок 4). Количество отрезков в каждом интервале может быть любое, но не менее пяти ($u_1 \geq 5$ и $u_2 \geq 5$).

3.2.3.3 Соответственно для каждого отрезка в каждом интервале определяются значения остаточного удлинения (δ_1, δ_2 и т.д.), которые помещаются в таблицу 1 (см. пункт 2.22) и используются при обработке данных испытаний (см. пункты 3.9.1.1 и 3.10.1).

3.3 Определение условных пределов длительной прочности

3.3.1 Математическая обработка результатов испытаний партии стали (сплава), основанная на формуле

$$\lg \tau_к = 0{,}4343\left(a_1 + \frac{b_1 - c_1\sigma}{T}\right) - \frac{m}{T}\lg\sigma + 2\lg T\,, \qquad (3)$$

производится на компьютере по программе Б.1.3 приложения Б. Коэффициент m для сталей (сплавов), предназначенных для энергомашиностроения, принимается равным 2400.

3.3.1.1 Необходимые для расчетов данные испытаний (температура t, номинальное напряжение σ и время до разрушения $\tau_к$) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.3.1.2 В результате математической обработки на компьютере получаются таблицы, в которых представлены значения времени до разрушения $\tau_к$ для заданных температур и напряжений, коэффициентов формулы (3) и значение дисперсии, характеризующее отклонение экспериментальных точек от расчетной поверхности в направлении оси $\ln\tau_к$.

3.3.1.3 Из полученных таблиц для расчетной температуры находится напряжение $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$ – условный предел длительной прочности, при котором $\tau_к = \tau_э$. Необходимые промежуточные значения напряжений находятся путем линейной экстраполяции.

3.3.1.4 По формуле (3) с определенными на компьютере коэффициентами можно построить график длительной прочности в координатах $\lg\tau_к - \lg\sigma$. Кроме того, результа-

ты математической обработки используются для построения параметрических диаграмм.

3.3.2 Для определения нормативных условных пределов длительной прочности, характеризующих марку стали, подсчитываются средние значения постоянных для М партий по формулам:

$$\overline{a}_1 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} a_{1_i}\ ;\quad \overline{b}_1 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} b_{1_i}\ ;\quad \overline{c}_1 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} c_{1_i}\ , \qquad (4)$$

где a_{1_i}, b_{1_i} и c_{1_i} — значения постоянных каждой партии, определенные по программе Б.1.3 приложения Б (см. пункт 3.3.1 настоящих Методических указаний).

3.3.2.1 Определение условных пределов длительной прочности математическим путем производится по формуле (3) подставлением в нее значений постоянных, подсчитанных по формулам (4).

Составляется через 10 МПа ряд значений напряжений, ограниченный наименьшим и наибольшим значениями $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$, определенными по пункту 3.3.1.3 для каждой из М партий. Последовательно в формулу (3) подставляются значения напряжений из этого ряда и определяется значение $lg\tau_к$. За величину $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$ для марки стали (сплава) принимается напряжение, когда $lg\tau_к = lg\tau_э$. Все значения $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$ для каждой партии и в формуле (3) должны соответствовать одной и той же температуре. Промежуточное значение $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$ определяется путем линейной интерполяции.

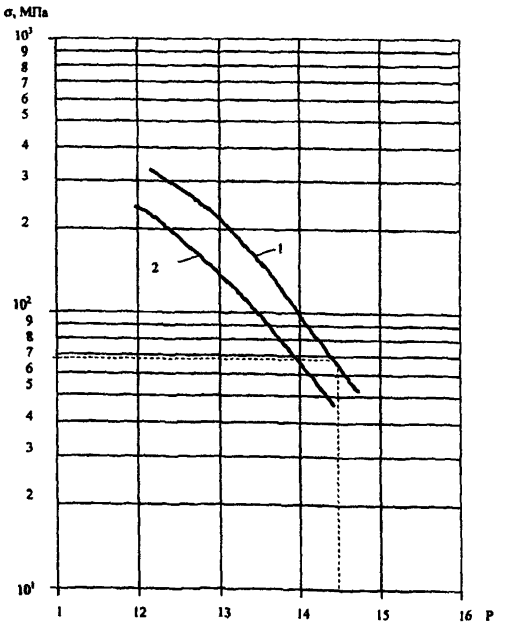
3.3.2.2 Значения условных пределов длительной прочности могут быть рассчитаны по параметрической диаграмме жаропрочности в координатах $P_{д.п} - lg\sigma$.

3.3.2.3 Значение параметра для построения параметрической диаграммы подсчитывается по формуле

$$P_{д.п} = (0{,}4343\overline{b}_1 - m\lg\sigma - 0{,}4343\overline{c}_1\sigma)\cdot 10^{-3}\ . \qquad (5)$$

Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.3.1, значения постоянных $\bar{b}_1$ и $\bar{c}_1$ — по пункту 3.3.2.

3.3.2.4 Задается ряд значений напряжений σ в диапазоне от σ_1 до σ_6 (см. пункты 2.8.2 или 2.10.2) или σ_8 (см. пункт 3.2.1.4), подсчитывается значение параметра $P_{д\,п}$ и строится параметрическая диаграмма жаропрочности (1 на рисунке 5).



$$P_{д\,п} = (0{,}4343b - m\lg\sigma - 0{,}4343c\sigma)\cdot 10^{-3}$$

Рисунок 5 — Параметрическая диаграмма жаропрочности

3.3.2.5 Для определения условных пределов длительной прочности для заданных температуры и ресурса рассчитывается значение параметра по формуле

$$P_{д.п} = T(\lg\tau_э - 2\lg T - 0{,}4343\bar{a}_1)\cdot 10^{-3}. \qquad (6)$$

Значение условного предела длительной прочности находится из формулы (5).

3.3.2.6 При необходимости определения условных пределов длительной прочности с вероятностью разрушения образцов, отличной от принятой для нормативных характеристик (p = 0,5), значение параметра для построения параметрической диаграммы рассчитывается по формуле

$$P_{д.п} = (0{,}4343\bar{b}_1 - m\lg\sigma - 0{,}4343\bar{c}_1\sigma + \\ + 0{,}4343Z_p\sqrt{S^2_{b_1} - 2\mathrm{cov}_{b,c}\,\sigma + S^2_{c_1}\sigma^2})\cdot 10^{-3} \qquad (7)$$

где $S^2_{b_1}$ и $S^2_{c_1}$ – дисперсии постоянных $\bar{b}_1$ и $\bar{c}_1$, подсчитываемые по формулам:

$$S^2_{b_1} = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(b_{1_i} - \bar{b}_1)^2; \qquad (8)$$

$$S^2_{c_1} = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(c_{1_i} - \bar{c}_1)^2; \qquad (9)$$

Z_p – коэффициент, определяемый по заданной вероятности разрушения образца согласно таблице 2;

$\mathrm{cov}_{b,c}$ – ковариация постоянных $\bar{b}_1$ и $\bar{c}_1$:

$$\mathrm{cov}_{b,c} = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(b_{1_i} - \bar{b}_1)\cdot(c_{1_i} - \bar{c}_1). \qquad (10)$$

Таблица 2 – Значения коэффициента Z_p для различных вероятностей разрушения образцов

Вероятность разрушения	0,010	0,025	0,050	0,100	0,500
Z_p	–2,33	–1,96	–1,64	–1,28	0,00

Расчеты ведутся по программе Б.2 приложение Б.

Для ряда напряжений подсчитываются значения параметра и строится параметрическая диаграмма жаропрочности для заданной вероятности разрушения (2 на рисунке 5).

Значение условного предела длительной прочности находится из формулы (7).

3.3.2.7 Упрощенный метод определения долговечности

3.3.2.7.1 Наиболее стабильным параметром стали является свободный член ($\bar{a} = 0{,}4343\bar{c}_1$) уравнения (3), что дает право в первом приближении считать $\bar{a}$ постоянной величиной, тогда задача оценки долговечности сводится к определению значений только двух коэффициентов – b_1 и c_1.

3.3.2.7.2 В этом случае достаточно ограничиться испытаниями на длительную прочность при двух температурно-силовых режимах – для $t_м$ и $t_м$ + 50°С. Напряжения для каждого опыта выбираются так, чтобы при рабочей температуре ($t_м$) время до разрушения не превышало 1000-1200 ч, а при форсированном режиме ($t_м$ + 50°С) было в пределах 300-500 ч. Если точки всех испытаний не выпадают за пределы нижней границы полосы разброса (линия 2 на рисунке 5), то исследуемая партия металла соответствует рассматриваемой марке стали. В противном случае дополнительно испытываются два образца (по одному на каждом температурно-силовом режиме), производится статистическая обработка данных по всем (шести) образцам с помощью уравнения (3) и определяются для исследованной партии коэффициенты $\bar{b}_1$ и $\bar{c}_1$.

Значительное сокращение числа испытываемых образцов существенно снижает суммарное время эксперимента.

3.3.2.7.3 При m = −2400 получены для ряда наиболее используемых в тепловой энергетике сталей следующие значения постоянного коэффициента $\bar{a}$:

сталь марки 12Х1МФ ..... $\bar{a} = -24{,}88$
сталь марки 15Х1М1Ф ..... $\bar{a} = -25{,}2$
сталь марки 15Х1М1ФЛ ..... $\bar{a} = -25{,}02$
сталь марки 1Х18Н12Т
(пароперегревательные трубы) ..... $\bar{a} = -20{,}38$
сталь марки 12Х11В2МФ (ЭИ756) ..... $\bar{a} = -34{,}37$
сталь марки 25Х1М1Ф (Р2М, роторная) ..... $\bar{a} = -24{,}1.$

3.3.3 Точность определения условных пределов длительной прочности по данному методу в диапазоне напряжений испытания от σ_1 до σ_6 (см. пункты 2.8.2 или 2.10.2) или σ_8 (см. пункт 3.2.1.4) составляет ±3%, если соблюдено одно из условий:

$\sigma_6 \le \sigma^t_{д\,п,\tau_э}$ или $\sigma_8 \le \sigma^t_{д.п,\tau_э}$.

3.4 Определение условных пределов ползучести

3.4.1 Математическая обработка результатов испытаний партии стали (сплава), основанная на формуле

$$\lg\tau_{\delta_э} = 0{,}4343\left(a_2 + \frac{b_2 - c_2\cdot\sigma}{T}\right) - \frac{m}{T}\lg\sigma + 2\lg T, \qquad (11)$$

производится на компьютере по программе Б.1.3 приложения Б. Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.3.1.

3.4.1.1 Необходимые для расчета данные испытания (температура t, номинальное напряжение σ и время $\tau_{\delta_э}$, при котором остаточное удлинение $\delta_8 = \delta_э$, определяемое согласно пункту 2.19) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.4.1.2 В результате математической обработки на компьютере получаются таблицы, в которых представлены

значения τ_{δ_3} для заданных температур и напряжений, коэффициентов формулы (11) и значение дисперсии, характеризующее отклонение экспериментальных точек от расчетной поверхности в направлении оси $\ln\tau_{\delta_3}$.

3.4.1.3 Из полученных таблиц для расчетной температуры находится напряжение $\sigma^{t}_{n-\delta_3,\tau_3}$ – условный предел ползучести, при котором $\tau_{\delta_3} = t_3$. Необходимое промежуточное значение напряжения определяется путем линейной интерполяции.

3.4.1.4 По формуле (11) с определенными на компьютере коэффициентами можно построить график ползучести в координатах $\ln\tau - \ln\sigma$. Кроме того, результаты математической обработки используются для построения параметрических диаграмм.

3.4.2 Для определения нормативных условных пределов ползучести, характеризующих марку стали, подсчитываются средние значения постоянных для М партий по формулам:

$$\bar{a}_2 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} a_{2_i}\,; \quad \bar{b}_2 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} b_{2_i}\,; \quad \bar{c}_2 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} c_{2_i}\,, \qquad (12)$$

где a_{2_i}, b_{2_i}, c_{2_i} – значения постоянных каждой партии, определенных по программе Б.1.3 приложения Б для пункта 3.4.1.

3.4.2.1 Определение условных пределов ползучести аналитическим методом производится по формуле (11), в нее подставляются значения постоянных, подсчитанные по формулам (12). Последовательность расчетов по формуле (11) аналогична расчетам по определению условных пределов длительной прочности по формуле (3), описанным в пункте 3.3.2.1.

3.4.2.2 Значения условных пределов ползучести могут быть рассчитаны по параметрической диаграмме жаропрочности в координатах $P_п - \lg\sigma$. Значение параметра для построения параметрической диаграммы подсчитывается по формуле

$$P_п = (0{,}4343\bar{b}_2 - m\lg\sigma - 0{,}4343\bar{c}_2\sigma)\cdot 10^{-3}. \qquad (13)$$

При построении диаграммы используются указания пункта 3.3.2.4 (см. рисунок 5).

3.4.2.3 С целью определения условных пределов ползучести для заданных температуры и ресурса рассчитывается значение параметра по формуле

$$P_п = T(\lg\tau_з - 2\lg T - 0{,}4343\bar{a}_2)\cdot 10^{-3} \qquad (14)$$

и из формулы (13) находится искомое значение.

3.4.2.4 При необходимости определения условных пределов ползучести с вероятностью, отличной от принятой для нормативных характеристик, значение параметра для построения параметрической диаграммы рассчитывается по уравнению

$$P_п = (0{,}4343\bar{b}_2 - m\lg\sigma - 0{,}4343\bar{c}_2\sigma + 0{,}4343Z_p \times \times\sqrt{S^2_{b_2} - 2\,\mathrm{cov}'_{b,c}\,\sigma + S^2_{c_2}\sigma^2})\cdot 10^{-3}, \qquad (15)$$

где дисперсии постоянных $\bar{b}_2$ и $\bar{c}_2$, а также их ковариация подсчитываются по формулам:

$$S^2_{b_2} = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(b_{2_i} - \bar{b}_2)^2; \qquad (16)$$

$$S^2_{c_2} = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(c_{2_i} - \bar{c}_2)^2; \qquad (17)$$

$$\mathrm{cov}'_{b,c} = \frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}(b_{2_i} - \bar{b}_2)\cdot(c_{2_i} - \bar{c}_2), \qquad (18)$$

а значение коэффициента Z_p находится по таблице 2.

Расчеты ведутся по программе Б.2 приложения Б.

Построение параметрической диаграммы жаропрочности аналогично указаниям пункта 3.3.2.6 для длительной прочности. Значение условного предела ползучести находится из формулы (15).

3.5 Определение условных пределов остаточного удлинения

3.5.1 Математическая обработка результатов испытаний партии стали (сплава), основанная на формуле

$$\lg\delta_к = 0{,}4343\left(a_3 + \frac{b_3 - c_3\cdot\sigma}{T}\right) - \frac{m}{T}\lg\sigma, \qquad (19)$$

производится с помощью компьютера по программе Б.1.3 приложения Б.

Значение коэффициента m принимается равным 800.

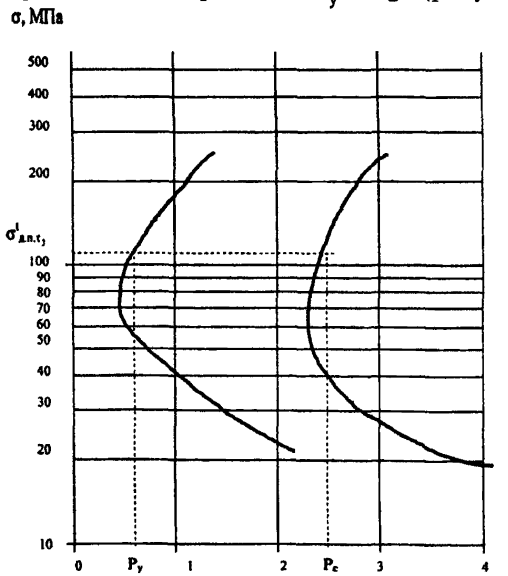
3.5.2 Необходимые для расчета данные испытаний (температура t, номинальное напряжение σ и значение остаточного удлинения при разрушении $\delta_к$) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.5.3 В результате математической обработки на компьютере получаются таблицы, в которых представлены значения остаточного удлинения $\delta_к$ при заданных значениях температуры и напряжения, коэффициентов уравнения (19) и значение дисперсии, характеризующее отклонение экспериментальных точек от расчетной поверхности по оси $\ln\delta_к$.

3.5.4 Из полученных таблиц для расчетной температуры и значения напряжения, равного условному пределу длительной прочности при $\tau_з$ (см. пункт 3.3.1.3), находится условный предел остаточного удлинения. Промежуточные значения напряжений и искомых величин определяются путем линейной интерполяции.

3.5.5 По формуле (19) с определенными на компьютере коэффициентами можно построить графики в координатах $\lg\sigma - \lg\delta_к$. Используя зависимость времени до разрушения от напряжения, определяемую формулой (3) (см. раздел 3.3), можно построить также графики временной зависимости остаточного удлинения после разрушения при постоянной температуре в координатах $\lg\tau_з - \lg\delta_к$. Результаты математической обработки используются для построения параметрических диаграмм.

3.5.6 Значения условных пределов остаточного удлинения можно рассчитать по параметрической диаграмме жаропрочности в координатах $P_y - \lg\sigma$ (рисунок 6).



$$P = (0{,}4343\bar{b} - m\lg\sigma - 0{,}4343\bar{c}\sigma)\cdot 10^{-3}$$

Рисунок 6 – Параметрическая диаграмма остаточного удлинения и сужения

3.5.6.1 Значение параметра для построения параметрической диаграммы подсчитывается по формуле

$$P_{\text{п}} = (0{,}4343b_3 - m\lg\sigma + 0{,}4343c_3\sigma)\cdot 10^{-3}. \qquad (20)$$

Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.5.1. При построении диаграммы используются указания пункта 3.3.2.4.

3.5.6.2 По формуле (20) для значения условного предела длительной прочности, соответствующего ресурсу τ_3, находится значение параметра P_y. По определенному значению параметра P_y и расчетной температуре $T = t_1 + 273$ подсчитывается значение искомого предела остаточного удлинения по формуле

$$\lg\delta^{t}_{\text{к},\tau_3} = P_y\frac{10^3}{T} + 0{,}4343a_3. \qquad (21)$$

3.6 Определение условных пределов остаточного сужения

3.6.1 Математическая обработка результатов испытаний партии стали (сплава), основанная на формуле

$$\lg\psi_{\text{к}} = 0{,}4343\left(a_4 + \frac{b_4 - c_4\sigma}{T}\right) - \frac{m}{T}\lg\sigma, \qquad (22)$$

производится на компьютере по программе Б.1.3 приложения Б. Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.5.1.

3.6.2 Необходимые для расчета данные испытаний (температура t, номинальное напряжение σ и остаточное сужение при разрушении $\psi_{\text{к}}$) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.6.3 В результате математической обработки на компьютере получаются таблицы, в которых представлены значения остаточного сужения $\psi_{\text{к}}$ при заданных значениях температуры и напряжения, а также коэффициенты уравнения (22) и значение дисперсии, характеризующее отклонение экспериментальных точек от расчетной поверхности по оси $\ln\psi_{\text{к}}$.

3.6.4 Из полученных таблиц для расчетной температуры и значения напряжения, равного условному пределу длительной прочности при $\tau_з$ (см. пункт 3.3.1.3), находится условный предел остаточного сужения. Промежуточные значения напряжений и искомых величин определяются путем линейной интерполяции.

3.6.5 По формуле (22) с определенными на компьютере коэффициентами можно построить графики в координатах $\lg\sigma - \lg\psi_к$.

Используя зависимость времени до разрушения от напряжения, определяемую формулой (3) (см. раздел 3.3), можно построить также графики временнóй зависимости остаточного сужения после разрушения при постоянной температуре в координатах $\lg\tau_к - \lg\psi_к$.

Результаты математической обработки используются для построения параметрических диаграмм.

3.6.6 Значения условных пределов остаточного сужения можно также рассчитать по параметрической диаграмме жаропрочности в координатах $P_c - \lg\sigma$ (см. рисунок 6).

3.6.6.1 Значение параметра для построения параметрической диаграммы подсчитывается по формуле

$$P_c = (0{,}4343b_4 - m\lg\sigma + 0{,}4343c_4\sigma)\cdot 10^{-3}. \qquad (23)$$

Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.5.1. При построении диаграммы используются указания пункта 3.3.2.4.

3.6.6.2 По формуле (23) для значения условного предела длительной прочности, соответствующего ресурсу $\tau_з$, находится значение параметра P_c. По расчетной температуре $T = t_1 + 273$ и определенному значению параметра P_c определяется значение искомого предела остаточного сужения по формуле

$$\lg\psi^{t}_{к,\tau_з} = P_c\frac{10^3}{T} + 0{,}4343a_4 \qquad (24)$$

3.7 Определение условных пределов равномерного остаточного удлинения и сужения

3.7.1 Математическая обработка результатов испытаний партии стали (сплава), основанная на формуле

$$\lg\delta_p = 0{,}4343\left(a_5 + \frac{b_5 + c_5\sigma}{T}\right) - \frac{m}{T}\lg\sigma, \qquad (25)$$

производится на компьютере по программе Б.1.3 приложения Б. Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.5.1.

3.7.2 Необходимые для расчета данные испытаний (температура t, номинальное напряжение σ и равномерное остаточное удлинение δ_p) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.7.3 В результате математической обработки на компьютере получаются таблицы, в которых представлены значения равномерного остаточного удлинения при заданных температурах и напряжениях, а также коэффициенты уравнения (25) и значение дисперсии, характеризующее отклонение экспериментальных точек от расчетной поверхности по оси $\ln\delta_p$.

3.7.4 Из полученных таблиц для расчетной температуры и значения напряжения, равного условному пределу длительной прочности при $\tau_з$ (см. пункт 3.3.1.3), находится условный предел равномерного остаточного удлинения. Промежуточные значения искомых величин определяются путем линейной интерполяции.

3.7.5 По формуле (25) с определенными на компьютере коэффициентами можно построить графики в координатах $\lg\sigma - \lg\delta_p$.

3.7.6 Для определения времени равномерного удлинения используется формула

$$\lg\tau_p = 0{,}4343\left(a_6 + \frac{b_6 + c_6\sigma}{T}\right) - \frac{m}{T}\lg\sigma + 2\lg T. \qquad (26)$$

Математическая обработка и представление полученных данных производятся аналогично пункту 3.3.1, при этом принимается $\tau_к = \tau_p$.

На основе данных формулы (26) можно построить графики зависимости времени равномерного удлинения от напряжения при постоянной температуре в координатах $\lg\tau_p - \lg\sigma$, а также получить график временнóй зависимости равномерного остаточного удлинения в координатах $\lg\tau_p - \lg\delta_p$.

3.7.7 Значения условных пределов равномерного остаточного удлинения δ^t_{p,τ_p} можно рассчитывать по параметрической диаграмме пластичности в координатах $P_{p.y} - \lg\sigma$.

3.7.7.1 Значение параметра для построения параметрической диаграммы подсчитывается по формуле

$$P_{p.y} = (0{,}4343b_5 - m\lg\sigma + 0{,}4343c_5\sigma)\cdot 10^{-3} \qquad (27)$$

Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.5.1. При построении диаграммы используются указания пункта 3.3.2.4.

3.7.7.2 По формуле (27) для условного предела длительной прочности, соответствующего ресурсу $\tau_з$, находится значение параметра $P_{p.y}$. По расчетной температуре $T = t_1 + 273$ и определенному значению параметра $P_{p.y}$ рассчитывается значение искомого предела равномерного остаточного удлинения по формуле

$$\lg\delta^t_{p,\tau_p} = P_{p.y}\frac{10^3}{T} + 0{,}4343a_5. \qquad (28)$$

3.7.7.3 Условный предел равномерного остаточного сужения определяется по формуле

$$\psi^t_{p,\tau_p} = \frac{\delta^t_{p,\tau_p}}{1+\delta^t_{p,\tau_p}}. \qquad (29)$$

3.8 Определение ресурса равномерного остаточного удлинения

3.8.1 Математическая обработка результатов испытаний партии стали (сплава), основанная на формуле (25), производятся на компьютере по программе Б.1.3 прило-

жения Б. Значение коэффициента m принимается согласно пункту 3.5.1.

3.8.2 Необходимые для расчета данные испытаний (температура t, номинальное напряжение σ) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.8.3 В результате математической обработки на компьютере получаются таблицы, в которых помещены значения равномерного остаточного удлинения при заданных температурах и напряжениях, а также коэффициенты уравнения (25) и значение дисперсии, характеризующее отклонение экспериментальных точек от расчетной поверхности по оси $\lg\delta_p$.

3.8.4 Из полученных таблиц для расчетной температуры и значения напряжения, равного условному пределу длительной прочности при $\tau_з$ (см. пункт 3.3.1.3), находится ресурс равномерного остаточного удлинения. Промежуточные значения напряжений и искомых величин определяются путем линейной интерполяции.

3.8.5 По формуле (25) с определенными на компьютере коэффициентами можно построить графики в координатах $\lg\sigma - \lg\delta_p$. Используя зависимость времени до разрушения от напряжения, определяемую формулой (3) (см. раздел 3.3), можно построить также графики временной зависимости равномерного остаточного удлинения при постоянной температуре в координатах $\lg\tau_к - \lg\delta_p$.

Результаты математической обработки используются для построения параметрических диаграмм.

3.8.6 Значения ресурса равномерного остаточного удлинения $\delta_{p,t,\tau}$, можно рассчитывать по параметрической диаграмме пластичности в координатах $P - \lg\sigma$.

3.8.6.1 Значение параметра для построения параметрической диаграммы подсчитывается по формуле (20).

Коэффициент m принимается согласно пункту 3.5.1. При построении диаграммы используются указания пункта 3.3.2.4.

3.8.6.2 По формуле (20) находится значение параметра P_y.

По расчетной температуре $T = t_1 + 273$ и определенному значению параметра P_y подсчитывается значение искомого ресурса равномерного остаточного удлинения по формуле

$$\lg \delta_{p,t,\tau_1} = P_y \frac{10^3}{T} + 0{,}4343\, a_3 . \qquad (30)$$

3.9 Определение изохронных кривых ползучести

3.9.1 Математическая обработка первичных кривых ползучести партии стали (сплава), основанная на уравнении состояния

$$\delta_в^п = \exp(a_7) T^{-2} \sigma_0^{\frac{m}{T}} \left(\delta_н + \delta_в^п\right)^{-n} \exp\left(-\frac{b_7 - c_7\sigma_0 - r\delta_в^п}{T}\right), \qquad (31)$$

производится на компьютере по программе Б.1.4 приложения Б.

В уравнении состояния:

$\sigma_0 = \sigma$ — при испытании с постоянным напряжением;

$\sigma_0 = \sigma\,(1 + \delta_н + \delta_в^п)$ — при испытании с постоянной нагрузкой.

Коэффициент m принимается согласно пункту 3.3.1.

3.9.1.1 Необходимые для расчета данные испытаний (температура t, номинальное напряжение σ, остаточное удлинение при нагружении $\delta_н$) и данные первичной обработки (см. пункт 3.2.3) (количество отрезков в интервале u_1 и u_2, значения отрезков времени $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ и остаточного удлинения по кривой остаточного деформирования $\delta_{в_1}^п$, $\delta_{в_2}^п$ и т.д.) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

3.9.1.2 В результате математической обработки на компьютере получаются значения постоянных a_7, b_7, c_7, r и n уравнения (31) и дисперсии натурального логарифма величины $\delta_{в_i}^п$, характеризующей отклонение экспериментальных значений логарифма скорости ползучести от расчетных.

3.9.2 Данные для построения кривых ползучести партии стали (сплава) определяются на компьютере по формулам:

– при испытаниях с постоянной нагрузкой

$$\tau_{\delta_в^п} = \exp(-a_7)T^2\sigma^{-\frac{m}{T}}\exp\left(\frac{b_7 - c_7\sigma(1+\delta_н)}{T}\right)\times$$
$$\times\int_0^{\delta_в^п}\frac{\left(\delta_н+\delta_в^п\right)^n}{\left(1+\delta_н+\delta_в^п\right)^{\frac{m}{T}}}\exp\left[-\delta_в^п\left(\frac{r+c_7\sigma}{T}\right)\right]\partial\delta_в^п\ ; \qquad (32)$$

– при испытаниях с постоянным напряжением

$$\tau_{\delta_в^п} = \exp(-a_7)T^2\sigma^{-\frac{m}{T}}\exp\left(\frac{b_7 - c_7\sigma}{T}\right)\times$$
$$\times\int_0^{\delta_в^п}\left(\delta_н+\delta_в^п\right)^n\exp\left(-\frac{r}{T}\,\delta_в^п\right)\partial\delta_в^п\ . \qquad (33)$$

В формулах (32) и (33) значение m принимается согласно пункту 3.3.1.

Значения времени $\tau_{\delta_в^п}$ при соответствующих им значениях остаточного удлинения $\delta_в^п$ получаются после обработки данных на компьютере по программе Б.1.5 приложения Б при T = const, σ = const и $\delta_н$ = const.

3.9.2.1 По полученным данным строятся кривые ползучести партии стали (сплава) в координатах $\tau_{\delta_в^п}$ – $\delta_в^п$ для каждого режима испытаний T_i, σ_i и $\delta_н$. Из уравнения (31) можно определить значение минимальной скорости ползучести $\delta_{min} = \frac{nT}{r} - \delta_н$.

3.9.3 Изохронные кривые ползучести строятся по полученным данным для партии стали (сплава) в координатах σ – δ при t = const и τ = const.

3.9.4 Для расчетной температуры $t_м$ = const строится семейство изохронных кривых. Каждая i-я кривая семейства получается для τ_i = const.

Начальной изохронной кривой является среднестатистическая кривая активного растяжения, для которой принимается $\tau_i = 0$. Все последующие изохронные кривые данного семейства получаются из первичных кривых ползучести, построенных для ряда значений напряжений, с учетом значения суммарного начального удлинения $\delta^c_н$. Значение $\delta^c_н$ для каждого значения времени τ_i = const определяется по начальной изохронной кривой.

В условиях эксплуатации допустимое значение деформации ползучести, как правило, не превышает 2%, поэтому даже при больших запасах изохронные кривые используются в пределах, не превышающих 5%.

При таком ограничении нет необходимости в механическом уравнении состояния учитывать изменение поперечного сечения рабочей части образцов и вводить дополнительный член вида $(1 + \delta_н + \delta^п_в)$ в уравнение (31).

3.10 Расчет характеристик релаксационной стойкости

3.10.1 Математическая обработка данных испытаний партии стали (сплава) производится на компьютере согласно пункту 3.9.1.

3.10.2 Данные для построения кривой релаксации партии стали (сплава) определяются на компьютере по программе Б.1.5 приложения Б, основанной на формуле

$$\tau_{\delta^п_в} = \exp(-a_7)T^2 \exp\left(\frac{b_7 - c_7\sigma}{T}\right) \times \\ \times \int_0^{\delta^п_в} \frac{\left(\delta_н + \delta^п_в\right)^n}{\left(\sigma - E_T\delta^п_в\right)^{\frac{m}{T}}} \exp\left[-\delta^п_в\left(\frac{r - c_7E_T}{T}\right)\right] \partial\delta^п_в , \qquad (34)$$

где m принимается согласно пункту 3.3.1.

Значения времени $\tau_{\delta_в^п}$ при соответствующих им значениях остаточного удлинения $\delta_в^п$ получаются после обработки данных при T = const и заданных значениях номинального напряжения σ и остаточного удлинения при нагружении $\delta_н$.

3.10.2.1 Для каждого значения времени $\tau_{\delta_в^п}$ и остаточного удлинения $\delta_в^п$ определяется значение остаточного напряжения по формуле

$$\sigma_{рк} = \sigma - E_T \delta_в^п.$$

3.10.2.2 Для заданного режима t, σ, $\delta_н$ строится кривая релаксации в координатах $\tau - \sigma_{рк}$.

3.10.3 Значение релаксационной стойкости $\sigma^t_{рк,\tau}$, находится по кривой релаксации при заданной долговечности $\tau_з$.

3.11 Для сталей тепловой энергетики 12Х1М1Ф, 15Х1М1Ф и 25Х1М1Ф допускается для предварительного анализа и прогноза использовать уравнение (48). После логарифмирования этого уравнения получаются формулы, близкие к приведенным в данном разделе.

4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИДА СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1 Условные обозначения:

$$\sigma_{экв} = \sigma_к \exp [\lambda (\eta - 1)], \qquad (35)$$

где $\sigma_к = \frac{1}{2} (\sigma_1 + |\sigma_1|) (1 - A_0) + \sigma_i A_0$;

λ — комплексный коэффициент, дающий оценку влияния однородного сложного напряженного состояния на активационные параметры разрушения; через λ_1 он оп-

ределяет степень влияния напряженного состояния на энергию активации, а через λ_2 – на концентрацию напряжений в микрообъемах металла;

$$\eta = \frac{2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{0{,}5(\sigma_1 + |\sigma_1|) + \sigma_i}$$

(здесь σ_1, σ_2 и σ_3 – главные нормальные напряжения, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$; A_0 – постоянная, отражающая долю влияния главного нормального напряжения σ_1 и интенсивности напряжений σ_i:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}\ \Big).$$

Оптимальное решение поставленной задачи дает объединение уравнения долговечности типа (3) с критерием прочности (35). В результате зависимость долговечности жаропрочных материалов с учетом вида сложного однородного напряженного состояния после логарифмирования представляется в удобном для дальнейшей обработки виде:

$$\lg\tau_к = a + l\lg T - \frac{m}{T}\lg\sigma_к + \\ + \frac{b_1}{T} - \frac{c}{T}\sigma_к \exp[\lambda_2(\eta - 1)] - b_2\frac{m}{T}(\eta - 1) \qquad (36)$$

где $a = \lg A$; $b_1 = 0{,}4343\ \frac{U_0}{R}$;

$b_2 = 0{,}4343\ \frac{\lambda_1}{R}$;

$c = 0{,}4343\ \frac{\gamma}{R}$;

l – показатель степени при температуре в предэкспоненциальной функции, $0 \le l \le 2$ (для материалов стационарного энергомашиностроения $l = 2$);

γ — коэффициент концентрации напряжений в микрообъемах материала;

U_0 — энергия активации разрушения;

m — показатель степени при напряжении в предэкспоненциальной функции уравнения долговечности (приложение А); для многих материалов энергомашиностроения m = 2400, а в общем случае значения m находятся в интервале ($400 \le m \le 4000$);

A — размерный коэффициент;

λ_1 и λ_2 — неотрицательны.

4.2 Оценка неизвестных коэффициентов уравнения типа (36) осуществляется в несколько этапов.

4.2.1 Проводятся испытания на длительную прочность трубчатых образцов при двух-трех уровнях температуры.

На одноосное растяжение испытываются две серии образцов: сплошные цилиндрические и тонкостенные трубчатые. Должно быть проведено несколько серий испытаний трубчатых образцов при плоском напряженном состоянии, в том числе при внутреннем давлении, крутящем моменте, сочетании осевой силы и крутящего момента. Для проверки изотропии материала рекомендуется проводить опыты при внутреннем давлении и осевой силе (двухосное равное растяжение) так, чтобы $\sigma_1 = 2\sigma_2$.

4.2.2 Размеры трубчатых образцов должны удовлетворять следующим требованиям:

$$\frac{S}{D_{ср}} \le 0{,}1; \quad \frac{l_0}{D_{ср}} \ge 5; \quad D_{ср} = \frac{D_н + D_в}{2}, \qquad (37)$$

где S — толщина стенки образца;

$D_н$ и $D_в$ — соответственно наружный и внутренний диаметры рабочей части образца;

l_0 — длина рабочей части.

4.2.3 Коэффициент A_0 рассчитывается по результатам испытаний в квадранте растяжения и сжатия ($\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 < 0$), например по формуле $A_0 = \frac{\sigma_р}{\sigma_{сж}}$, где $\sigma_р$ и $\sigma_{сж}$ – прочность при растяжении и сжатии при $\tau_к = \text{const}$.

4.2.4 Изменяя дискретно значения l и m, полагая $\lambda_2 = 0$, сравнивая дисперсии отклонений расчетных по формуле (36) и экспериментальных значений логарифмов τ_i и выбирая расчет с наименьшей дисперсией, можно получить оценку значений коэффициентов *a*, b_1, b_2, c.

4.2.5 Путем перебора значений λ_2 аналогично пункту 4.2.4 определяются оптимальные значения всех коэффициентов уравнения (36), которые позволяют оценивать влияние вида сложного однородного напряженного состояния на долговечность материала в любой точке пространства $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

4.3 Заданный расчет долговечности производится по уравнению (36) и программе Б.5 приложения Б. При этом характеристиками напряженного состояния являются главные нормальные напряжения σ_1, σ_2, σ_3 и ряд производных функций от них: $\sigma_{экв}$, $\sigma_к$, η, коэффициент A_0.

5 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

5.1 Процесс ползучести при эксплуатации энергетического оборудования может сопровождаться развитием малоцикловой усталости металла, связанной с нестационарностью (цикличностью) изменения эксплуатационных параметров нагружения. В этих условиях долговечность металла и его длительная прочность могут значительно отличаться от аналогичных характеристик для стационарного уровня нагружения.

5.2 Под малоцикловой усталостью понимается процесс, развивающийся в результате действия переменных температурных и механических напряжений, вызывающих циклическое упругопластическое деформирование металла, накопление повреждений и разрушение в области малого числа циклов нагружения (от 10^2 до 10^5). К характерным циклическим режимам, определяющим развитие малоцикловой усталости металла элементов энергооборудования, относятся пуски и остановы, переходные режимы эксплуатации, термические удары, циклические компенсационные и термические колебания.

5.3 Для оценки изменения характеристик длительной прочности и долговечности испытания проводятся в режимах последовательного (комбинированного) нагружения при ползучести и малоцикловой усталости. Повреждаемость от ползучести и малоцикловой усталости рассчитывается по параметру суммарной относительной долговечности

$$A_c = \sum_{i=1}^{n} \tilde{N}_i + \sum_{i=1}^{m} \tilde{\tau}_i , \qquad (38)$$

где $\tilde{N}_i = N_i/N_{pi}$ — доля относительной долговечности при малоцикловой усталости в i-м режиме с числом циклов нагружения N_i и числом циклов до разрушения N_{pi};

$\tilde{\tau}_i = \tau_i/\tau_{pi}$ — доля относительной долговечности при ползучести в i-м режиме при времени нагружения τ_i и времени до разрушения τ_{pi};

n и m — число режимов при малоцикловой усталости и ползучести соответственно.

5.4 Оценка малоцикловой повреждаемости производится на основе кривых малоцикловой усталости, полученных в соответствии с требованиями ГОСТ 25.505-85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении», в условиях жесткого

нагружения (с заданными не менее чем на трех уровнях значениями упруго-пластической деформации). Для оценки характеристик малоцикловой усталости допускается использовать зависимости циклической долговечности, определенные по механическим (жаропрочным) свойствам металла.

5.5 Оценка характеристик длительной прочности производится по упрощенному методу (раздел 3) с испытанием не менее шести образцов для каждого состояния материала. Выбранный уровень напряжений должен соответствовать области межзеренного разрушения. Для оценки доли повреждаемости от ползучести допускается использование среднемарочных зависимостей длительной прочности.

5.6 Испытания при последовательном нагружении проводятся с внесением фиксированной доли предварительного малоциклового повреждения на уровне 0,3 и 0,7 с последующим испытанием в условиях ползучести. После малоциклового испытания поверхность образцов должна подвергаться дополнительной обработке с целью удаления поверхностного поврежденного слоя металла.

Равноправной для оценки суммарной долговечности является методика предварительного внесения повреждаемости от ползучести в интервале 0,3-0,7 и определения остаточной долговечности в условиях малоциклового нагружения.

5.7 Обработка данных испытаний производится для каждой из заданных температур для получения зависимости параметра суммарной относительной долговечности в виде

$$A_c = 1 + \alpha_c\sqrt{2}\,[1 - (\sum_{i=1}^{u} N_i/N_{pi} - \sum_{i=1}^{m} t_i/t_{pi})^2], \qquad (39)$$

где α_c — экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий степень отклонения полученных данных от прямой при линейном суммировании повреждаемости и зависящий от уровня и последовательности приложения стационарной и циклической компонент нагружения. При этом

$$|\alpha_c| < \sqrt{2}/2. \qquad (40)$$

При $\alpha_c > 0$ имеет место упрочнение материала при взаимодействии ползучести и малоцикловой усталости, при $\alpha_c < 0$ – разупрочнение по отношению к зависимости линейного суммирования ($\alpha_c = 0$).

5.8 Для определения значения α_c в каждом режиме нагружения с заданными значениями температуры T, напряжения ползучести σ, размаха упругопластической деформации в цикле и доли циклического N или статического τ повреждения металла испытывается не менее двух образцов. По полученным данным рассчитываются значения параметра A_c в соответствии с формулой (38), затем определяется среднее значение $\overline{A}_c$ и находится значение коэффициента α_c по соотношению

$$\alpha_c = (\overline{A}_c - 1)/\sqrt{2}. \qquad (41)$$

Минимальное из значений α_c, полученных по экспериментальным данным, используется для дальнейшей оценки характеристик длительной прочности в условиях ползучести и малоцикловой усталости. При $\alpha_c \geq 0$ считается, что $A_c = 1$.

5.9 Обработка данных испытаний для прогнозирования характеристик длительной прочности и остаточного ресурса в условиях малоциклового нагружения производится в соответствии с модифицированным параметрическим уравнением в виде

$$\lg\tau_p = a + 2\lg T - \frac{m}{T}\lg\sigma + \frac{b}{T} + \frac{k}{T}\tilde{N} - \frac{c}{T}\sigma + \frac{l}{T}\sigma\tilde{N}, \qquad (42)$$

где коэффициенты a, m, b и c соответствуют аналогичным коэффициентам параметрического уравнения (3); коэффициенты k и l определяют изменения активационных параметров разрушения, связанные с изменением состояния материала при внесении доли малоциклового повреждения;

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^{n} \tilde{N}_i. \qquad (43)$$

5.10 Дальнейшая оценка характеристик длительной прочности и долговечности производится для заданных условий длительного статического и нестационарного нагружения по рабочим параметрам оборудования и предполагаемым циклическим режимам эксплуатации с выделением экстремально нагруженных конструктивных зон с учетом соответствующих коэффициентов концентрации напряжений.

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОСТИ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА

6.1 Условные обозначения применяются в соответствии с разделами 1.1, 2.1 и 3.1 настоящих Методических указаний.

6.2 В разделе 3 изложен метод расчета характеристик прочности и пластичности при разрушении, включающий критическую фазу развития ползучести (интенсивного накопления повреждений и деформации ползучести), которую необходимо исключить при оценке срока службы.

6.3 Деформационную способность в первом приближении можно рассчитывать по уравнению

$$\delta_i = D\sigma^k \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right)\omega_i, \qquad (44)$$

где $\omega_i = \left(\frac{\tau_i}{\tau_p}\right)^p$ (здесь p – рассчитываемый коэффициент).

Для значительного снижения роли критической стадии ползучести следует использовать формулу оценки поврежденности, выраженную через среднюю деформацию ползучести, накопленную с момента приложения нагрузки до момента разрыва материала. В этом случае поврежденность

оценивается по значению средней деформации ползучести, рассчитываемому по формуле

$$\bar{\delta}_к = \frac{1}{\tau_к}\int_0^{\tau_к}\delta_п(\tau)\,\partial\tau = A\sigma^{-\frac{m}{T}}\exp\left[\frac{b+c\sigma}{T}\right]. \qquad (45)$$

Степень поврежденности определяется величиной отношения

$$\omega_i = \left[\frac{\frac{1}{\tau_i}\int_0^{\tau_i}\delta_п(\tau)\partial\tau}{\frac{1}{\tau_к}\int_0^{\tau_к}\delta_п(\tau)\partial\tau}\right] \qquad (46)$$

При $\omega_i = 1$ происходит исчерпание деформационной способности и наступает разрушение материала.

6.4 Остаточный ресурс определяется по уравнению

$$\tau_{p_i} = B\,T^l\,\sigma^{-\frac{m}{T}}\exp\left(\frac{U-\gamma\sigma}{T}\right)\cdot\omega_i, \qquad (47)$$

где ω_i находится по формуле (46).

6.4.1 В качестве первого приближения оценки поврежденности можно использовать формулу

$$\omega_i = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_к}\right)^N$$

где N — коэффициент, аналогичный p (см. пункт 6.3).

6.4.2 Более точной оценкой поврежденности является формула (46), введение которой в уравнение (47) значительно повышает достоверность оценки остаточного ресурса из-за существенного снижения роли критической фазы ползучести.

6.5 На кривых ползучести существуют **три** реперные точки, по которым можно судить о степени **поврежденности** материала.

6.5.1 Процесс ползучести состоит из двух этапов. На первой стадии скорость затухает и достигает минимума при окончании первого этапа процесса (первая реперная точка).

Уравнения механического состояния позволяют оценить значение деформации окончания затухающей стадии ползучести

$$\delta_{\text{п}}^{\text{c}} = \frac{\text{nT}}{\text{r}} - \delta_0 .$$

На этой стадии повреждения практически отсутствуют (самый безопасный период).

6.5.2 Вторая реперная точка связана с моментом перехода от обратимой поврежденности к необратимой. До трехкратного увеличения скорости ползучести ($\dot{\delta}_{\text{п}} = 3\dot{\delta}_{\text{min}}$) долговечность восстанавливается полностью. После этого момента дальнейшая эксплуатация требует восстановительной термической обработки, позволяющей залечить поры и улучшить структуру металла. С помощью уравнения состояния рассчитывается критическое значение накопленной деформации ползучести, после которой без термической обработки эксплуатация связана с определенным риском.

6.5.3 По мере развития ускоренной стадии ползучести происходит увеличение количества пор и их слияние в микротрещины, после чего наступает критическая фаза ползучести, которую необходимо исключить из допустимого ресурса. В этой стадии применение восстановительной термической обработки может оказаться неэффективным.

За время до разрушения (третья реперная точка) можно считать время накопления предельно допустимой деформации. При этом оно должно быть не более 90% суммарной долговечности.

7 ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА (СТАЛЕЙ 12Х1МФ, 15Х1М1Ф И 25Х1М1Ф) В ЭКСПЛУАТАЦИИ

7.1 Метод заключается в определении предела длительной прочности металла, находящегося в эксплуатации, по результатам испытаний не менее четырех образцов при одном и том же температурно-силовом режиме. Если время до разрушения хотя бы одного образца отличается от среднего более чем в два раза, проводятся испытания еще двух образцов в том же температурно-силовом режиме.

7.2 Для энергетических перлитных сталей хромомолибденованадиевого класса для предварительного анализа и прогнозирования жаропрочных характеристик возможно использование зависимости

$$B = A\sigma^{-2}\exp\left(\frac{W + c\sigma^2}{KT} + \alpha\sigma\right), \qquad (48)$$

где B — исследуемый параметр металла (в частности, время до разрушения τ);

A, c — постоянные коэффициенты;

σ — напряжение, МПа;

W — энергия активации ползучести (разрушения), равная $6{,}4\cdot10^{-19}$ Дж (4 эВ);

K — постоянная Больцмана;

T — температура, К;

$\alpha = 2\cdot10^{-8}$ Па.

Найти A и c можно, если прологарифмировать уравнение и применить программу Б.4.1 приложения Б.

7.3 На формуле (48) основывается ускоренный метод оценки долговечности энергетических материалов. Последовательность действий приведена ниже.

7.4 Согласно действующим НД рассчитывается эксплуатационное напряжение $\sigma_э$ в элементе.

7.5 Рассчитывается эксплуатационный параметр нагружения:

$$П_э = \frac{\sigma_э^2}{T_э},$$

где $T_э$ – температура эксплуатации паропровода.

7.6 Выбирается такой повышенный режим испытания образца (напряжение $\sigma_и$, температура $T_и$), при котором параметр режима испытания ($П_и$) будет равным эксплуатационному ($П_э$):

$$П_и = \frac{\sigma_и^2}{T_и} = П_э,$$

однако механизм разрушения образца не меняется. Для паропроводов температура $T_и$ не должна превышать 600 – 620°С.

7.6.1 Испытываются образцы в едином температурно-силовом режиме (под напряжением $\sigma_и$ и при температуре $T_и$) до разрушения. Время до разрушения металла в условиях эксплуатации рассчитывается (программа Б.4.2 приложения Б) *по формуле*

$$\tau_э = \tau_и \frac{\sigma_и^2}{\sigma_э^2} \exp\left[\frac{W}{K}\cdot\left(\frac{1}{T_э}-\frac{1}{T_и}\right)\right]\cdot\exp\left[\alpha\cdot(\sigma_э-\sigma_и)\right], \qquad (49)$$

где $\tau_и$ – среднее время до разрушения образцов:

$$\tau_и = \frac{\sum_{i=1}^{M}\tau_{иi}}{M}$$ (здесь M – число образцов);

α, W, K – определены в пункте 7.2.

7.6.2 Коэффициент запаса по долговечности равен

$$K_t = \frac{t_э}{10^5}.$$

7.6.3 Требуемому полуторакратному коэффициенту запаса длительной прочности $K_{д.п} = K_t^{0,263}$ соответствует коэффициент запаса по долговечности $K_t = 5,7$.

7.6.4 Если K_t меньше 5,7, необходимо провести исследование структуры и степени поврежденности и внести необходимые уточнения, а при необходимости провести испытания на длительную прочность по программе сокращенных испытаний.

7.6.5 Условный предел длительной прочности металла при рабочей температуре равен $\sigma_{д.п} = K_{д.п}\,\sigma_э$.

7.6.6 Анализ всех полученных данных, в том числе по прочности и пластичности при длительном разрыве, позволяет решить вопрос о возможности снижения запаса длительной прочности.

8 КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА ЖАРОПРОЧНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ (СПЛАВА)

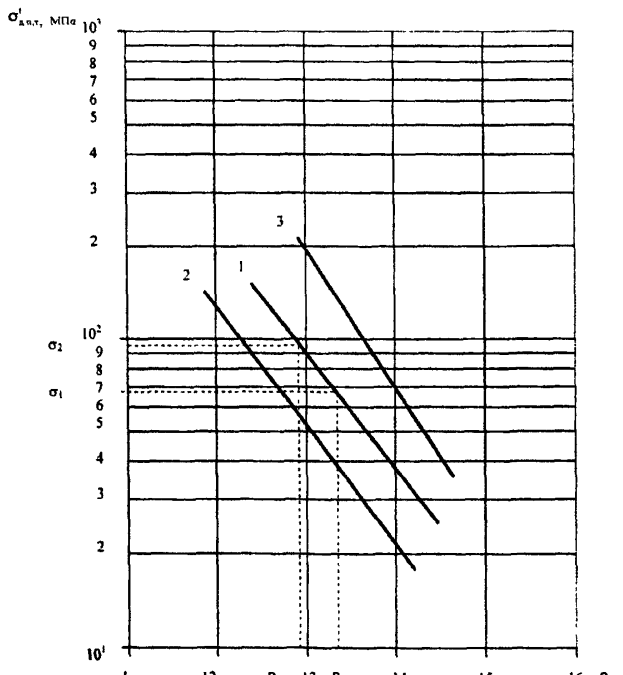
8.1 Условные обозначения приняты в соответствии с разделами 1.1; 2.1 и 3.1.

8.2 Качественный контроль жаропрочных свойств поступающего на предприятия энергомашиностроения металла и металла изделий, а также приемочный контроль изготавливаемого на них оборудования производятся по ускоренному методу (см. раздел 7), план испытаний при этом должен соответствовать оценочному (см. раздел 2.11), если он не оговорен действующими техническими условиями или заводскими инструкциями.

8.3 Количественная оценка жаропрочных свойств производятся на металле, предназначенном для особо ответственных изделий, или при их приемочном контроле. Этот метод применяется также при аттестационных испытаниях и оценке перспективности разработки и применения новой марки стали (сплава) по уровню ее характеристик длительной прочности.

8.3.1 Испытания металла проводятся по плану сокращенных испытаний (см. раздел 2.10), а обработка данных — по упрощенному математическому методу (см. раздел 7).

8.3.2 Строится нормативная параметрическая диаграмма длительной прочности (рисунок 7), на которую наносятся все данные испытаний и значение условного предела длительной прочности $\sigma^{t}_{д.п,\tau_э}$.



$$P_{д.п} = T\,(\lg\tau_э - 2\lg T - \alpha)\,10^{-3}$$

Рисунок 7 – Нормативная параметрическая диаграмма длительной прочности

8.3.3 Длительная прочность оцениваемой партии металла или изделий из него будет соответствовать нормативной для марки стали (сплава), если значение $\sigma^{t}_{д.п,\tau_э}$ лежит внутри допускаемой полосы разброса, оговоренной в соответствующих документах (линии 2 и 3 на рисунке 7).

8.3.4 Если длительная прочность оцениваемого металла или изделий из него не соответствует нормативным характеристикам (см. пункт 8.3.3), то при необходимости можно определить сокращенный по сравнению с $\tau_э$ ресурс по формуле

$$\lg\tau_э = \frac{P_{д\,п}}{T} + 2\lg T - \alpha, \qquad (50)$$

где T — расчетная температура при эксплуатации изделия, К.

8.3.5 Для некоторых марок сталей (особенно имеющих достаточно высокую пластичность) возможно увеличить остаточный ресурс за счет снижения запаса прочности.

8.3.6 Разработка и применение новой марки стали (сплава) считаются перспективными по уровню ее характеристик длительной прочности, если не менее 75% данных испытаний и рассчитанный условный предел длительной прочности лежат выше допустимой полосы разброса нормативных характеристик близкой к ней промышленно применяемой марки стали или сплава (линия 2 на рисунке 7).

9 ОЦЕНКА ЖАРОПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

9.1 Условные обозначения:

$\tau_н$ — наработка (продолжительность эксплуатации металла изделий до его исследования), ч;

$\tau^{э}_{д}$ — дополнительный ресурс, ожидаемое время дополнительной эксплуатации металла изделий после $\tau_н$, ч;

$\sigma^{t}_{д.п,\tau^{э}_{д}}$ – условный предел длительной прочности при расчетной температуре изделия $t_м$ и дополнительном ресурсе $\tau^{э}_{д}$, МПа;

$\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение в металле при его дополнительной эксплуатации, МПа;

$\delta_{д}$ – допустимое остаточное удлинение изделия при его дополнительной эксплуатации, %;

n – допустимый коэффициент запаса по длительной прочности.

Остальные условные обозначения – согласно разделам 1.1; 2.1 и 3.1.

9.2 Определение механических свойств

9.2.1 Испытания проводятся при комнатной и повышенной температуре.

9.2.2 План испытаний принимается в соответствии с требованиями инструкции по эксплуатации и наблюдению за металлом энергооборудования.

9.2.3 Рекомендуется для испытываемого металла строить температурную зависимость в интервале от $t_1 = 20°C$ до $t_1 = t_м$ (см. раздел 11).

9.3 Определение дополнительного ресурса

9.3.1 Испытания на длительную прочность проводятся по плану сокращенных испытаний (см. раздел 2.10), а данные испытаний обрабатываются упрощенным математическим методом (см. разделы 3, 5 и 7).

9.3.2 Определение значений напряжений при испытаниях (см. разделы 2.9 и 2.10), а также условного предела длительной прочности производится при времени $\tau^{э}_{д}$, значение которого должно соответствовать ожидаемому дополнительному ресурсу металла изделий, при этом должно быть соблюдено условие $\tau^{э}_{д} \le \tau_{з}$.

9.3.3 По данным испытаний и результатам обработки строится график длительной прочности при $t = t_м$ в координатах $lg\tau - lg\sigma$, на который наносятся значения $\sigma^{t}_{д.п,\tau^{э}_{д}}$ и $\tau^{э}_{д}$ (рисунок 8).

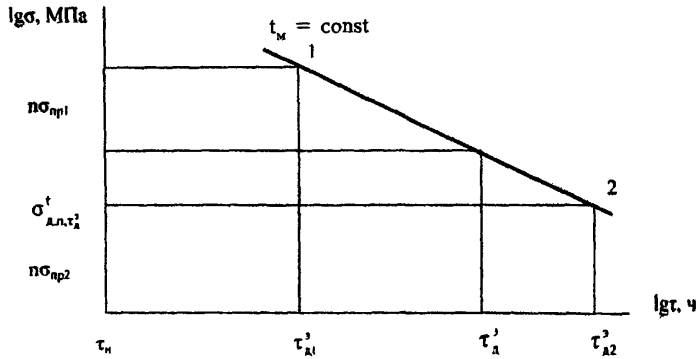


Рисунок 8 – Схема определения дополнительного ресурса эксплуатации

9.3.4 По значению приведенного напряжения в металле изделия, умноженному на коэффициент запаса $nσ_{пр}$, и линии графика длительной прочности определяется дополнительный ресурс $τ^э_д$ (см. рисунок 8).

9.3.5 Испытания считаются проведенными правильно, если на линии, по которой определяется условный предел длительной прочности, лежат данные не менее четырех уровней напряжений, а разрушение образцов носит межзеренный характер и при этом значение дополнительного ресурса $τ^э_{д1} \leq τ^э_д$ (см. рисунок 8). Если условие не соблюдено, т.е. $τ^э_{д2} > τ^э_д$ (см. рисунок 8), то проводятся дополнительные испытания при напряжениях, меньших $σ_6$ (см. раздел 2.10) или $σ_5$ (см. раздел 2.9), при этом задаются значением $τ^э_д$, бóльшим первоначально принятого.

9.3.6 Рекомендуется при определении дополнительного ресурса учитывать пластические свойства испытываемого металла изделий.

9.3.6.1 Испытания на длительную прочность проводятся с измерением деформации по ГОСТ 3248-81.

9.3.6.2 Определяются по разделу 3.5 условный предел остаточного удлинения $δ^э_д$ и по разделу 3.7 – условный

предел равномерного остаточного удлинения $\delta^{t_э}_{к,\tau_б}$ при $t = t_м$, $\sigma = n\sigma_{пр}$ и $\tau_э = \tau^э_{д1}$.

9.3.6.3 Значение допустимого остаточного удлинения $\delta_д$ находится из условий:

– если $\left(\delta^{t_м}_{к,\tau^э_{д1}} - \delta^{t_м}_{р,\tau_р}\right) \le 0{,}02\%$, то $\delta_д = 0{,}3\delta^{t_м}_{р,\tau_р}$ или

– если $\left(\delta^{t_м}_{к,\tau^э_{д1}} - \delta^{t_м}_{р,\tau_р}\right) > 0{,}02\%$, то $\delta_д = 0{,}5\delta^{t_м}_{р,\tau_р}$.

9.3.6.4 Значение дополнительного ресурса рассчитывается по формуле

$$\tau_{\delta^п_в} = \exp(-a)\ T^2\ \sigma^{-\frac{m}{T}}\ \exp\left[\frac{b - c\sigma(1+\delta_н)}{T}\right] \times \left[\int_0^{\delta^п_в} \frac{\left(\delta_н + \delta^п_в\right)^n}{\left(1+\delta_н+\delta^п_в\right)^{\frac{m}{T}}}\ \exp\left[-\delta^п_в\left(\frac{c\sigma + r}{T}\right)\right] \partial\delta^п_в\right] \quad (51)$$

с определением $\tau^э_д$ по $\delta_д$, $\sigma = n\sigma_{пр}$ и $T = t_м + 273$.

9.3.6.5 За допустимое время дальнейшей безаварийной эксплуатации детали принимается наименьшее значение, определенное по пунктам 9.3.4 и 9.3.6.4.

10 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ РЕСУРСЕ

10.1 Условные обозначения:

$\tau_с = \tau_э + \tau_д$ – суммарный ресурс; время, большее заданного ресурса, ч;

$\sigma^t_{д.п,\tau_с}$ – условный предел длительной прочности при температуре изделия t и времени $\tau_с$, МПа.

Остальные условные обозначения – согласно разделам 1.1; 2.1 и 3.1.

10.2 Если для партий и марки стали (сплава) определение значения условного предела длительной прочности $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$ при заданном ресурсе $\tau_э$ было произведено по настоящим Методическим указаниям, то значение условного предела длительной прочности $\sigma^t_{д.п,\tau_c}$ для суммарного ресурса τ_c находится либо математическим путем по формуле

$$\lg\tau_c = 0{,}4343\left(a_1 + \frac{b_1 + c_1\sigma}{T}\right) + \frac{m}{T}\lg\sigma + 2\lg T, \qquad (52)$$

либо в параметрической форме из формулы

$$P_{д.п} = \left(0{,}4343\bar{b}_1 - m\lg\sigma - 0{,}4343\bar{c}_1\sigma\right)\cdot 10^{-3}. \qquad (53)$$

10.3 Если определение значения $\sigma^t_{д.п,\tau_э}$ было произведено на основании данных произвольных испытаний, то значение $\sigma^t_{д.п,\tau_c}$ находится математическим путем в соответствии с разделом 5.

10.4 Точность определения условного предела длительной прочности при суммарном ресурсе $\sigma^t_{д.п,\tau_c}$ составит ± 6%, если $\tau_c = 2{,}0\ \tau_э$, а наименьшее напряжение при испытаниях $\sigma_{min} < \sigma^t_{д.п,\tau_э}$ или если $\tau_c = 1{,}5\tau_э$, а наименьшее напряжение при испытаниях $\sigma_{min} < \sigma^t_{д.п,\tau_э}$.

10.5 Для определения $\sigma^t_{д.п,\tau_c}$ с точностью ±3% необходимо, чтобы наименьшее напряжение испытания было $\sigma_{min} < \sigma^t_{д.п,\tau_c}$. Если это условие не соблюдено, то либо проводятся дополнительные испытания при напряжениях, меньших σ_6 или σ_8 (см. пункт 3.2.1.7), либо повторяются испытания для суммарного ресурса (см. раздел 2.8). При проведении дополнительных или повторных испытаний должны быть соблюдены требования настоящих Методических указаний по количеству партий и планам испытаний.

11 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

11.1 Условные обозначения:

$\sigma_{в_i}$ – предел прочности образца, МПа;

$\sigma_{0,2_i}$ – предел текучести образца, МПа;

δ_i – относительное удлинение образца, %;

ψ_i – относительное сужение образца, %;

$(\sigma_в)^л$, $(\sigma_в)^п$, $(\sigma_в)$, $\sigma_в$ – предел прочности лабораторных, первичных, предварительно-нормативных и нормативных характеристик, МПа;

$(\sigma_{0,2})^л$, $(\sigma_{0,2})^п$, $(\sigma_{0,2})$, $\sigma_{0,2}$ – предел текучести лабораторных, первичных, предварительно-нормативных и нормативных характеристик, МПа;

$(\delta)^л$, $(\delta)^п$, (δ), δ – относительное удлинение лабораторных, первичных, предварительно-нормативных и нормативных характеристик, %;

$(\psi)^л$, $(\psi)^п$, (ψ), ψ – относительное сужение лабораторных, первичных, предварительно-нормативных и нормативных характеристик, %;

d – коэффициент;

$S^2_{\sigma_в}$, $S^2_{\sigma_{0,2}}$, S^2_δ, S^2_ψ – дисперсии характеристик.

Остальные обозначения – согласно разделам 1.1 и 3.1.

11.2 Механические свойства лабораторных, первичных, предварительно-нормативных и нормативных характеристик стали (сплава) получаются путем математической обработки результатов кратковременных испытаний образцов, представляющих определенную группу партий металла. Количество образцов в партии должно соответствовать указаниям пункта 2.21, а количество партий в группе для получения определенной категории характеристик – пунктов 2.12, 2.13, 2.14 и 2.15.

11.3 Определение каждой характеристики производится по результатам испытаний образцов, помещенным в таблицу 1 (см. пункт 2.22), для каждой температуры отдельно.

11.4 Механические свойства.

11.4.1 Пределы прочности и текучести, относительные удлинение и сужение определяются как средние значения экспериментальных данных по образцам, для них же находятся по стандартным формулам дисперсии $S^2_{\sigma_в}$, $S^2_{\sigma_{0,2}}$, S^2_{δ}, S^2_{ψ}.

11.4.2 Для вероятности разрушения, отличной от нормальной (p = 0,5), значения пределов прочности и текучести, относительных удлинения и сужения рассчитываются по формулам:

$$\lg \sigma_{в_p} = \lg \sigma_в + Z_p S_{\sigma_в}; \quad (54)$$

$$\lg \sigma_{0,2_p} = \lg \sigma_{0,2} + Z_p S_{\sigma_{0,2}}; \quad (55)$$

$$\lg \delta_p = \lg \delta + Z_p S_\delta; \quad (56)$$

$$\lg \psi_p = \lg \psi + Z_p S_\psi. \quad (57)$$

Значения коэффициента Z_p принимаются согласно пункту 3.3.2.6.

11.5 Температурная зависимость.

11.5.1 Производится структурная классификация жаропрочных сталей и сплавов по значению $\sigma^{20}_{0,2}$: 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600; 650; 700; 750; 800; 850; 900; 950 и 1000 МПа – всего 17 состояний.

Каждое из этих состояний представляется полным комплексом физико-химических, механических и структурных характеристик для двух-пяти материалов.

11.5.2 Температурная зависимость пределов прочности и текучести, относительных удлинения и сужения определяется путем математической обработки всех механических испытаний. При этом число уровней температуры испытания должно быть не менее четырех (см. пункт 2.21).

11.5.3 Уравнения для определения температурных зависимостей характеристик механических свойств стали (сплава) имеют вид:

$$\lg\sigma_в = a_8 + b_8 t_i + c_8 t_i^2; \quad (58)$$

$$\lg\sigma_{0,2} = a_9 + b_9 t_i + c_9 t_i^2; \quad (59)$$

$$\lg\delta = a_{10} + b_{10} t_i + c_{10} t_i^2; \quad (60)$$

$$\lg\psi = a_{11} + b_{11} t_i + c_{11} t_i^2. \quad (61)$$

11.5.4 На основе уравнений (58) – (61) для каждого отдельного состояния устанавливаются усредненные температурные зависимости характеристик прочности и пластичности, принимаемые далее в качестве эталонных и обозначаемые штрихом: $\sigma_в'$, $\sigma_{0,2}'$, σ' и т.д.

11.5.5 Математическая обработка результатов механических испытаний производится с помощью компьютера по стандартной статистической программе Б.6 приложения Б.

11.5.6 Необходимые для расчета данные испытаний (температура и величины механических свойств) берутся из таблицы 1 (см. пункт 2.22).

11.5.7 В результате математической обработки на компьютере получаются значения коэффициентов уравнений (58) – (61) и дисперсии характеристик $S^2_{\sigma_в}$, $S^2_{\sigma_{0,2}}$, S^2_δ, S^2_ψ.

11.5.8 Если значения дисперсий, полученных по пункту 11.5.7, превышают 10% начального разброса, то математическая обработка результатов испытаний производится на компьютере по статистической программе, упомянутой в пункте 11.5.5 на основе уравнений:

$$\lg\sigma_в = a_{12} + b_{12}t_i + c_{12}t_i^2 + d_1t^3; \quad (62)$$

$$\lg\sigma_{0,2} = a_{13} + b_{13}t_i + c_{13}t_i^2 + d_2t^3; \quad (63)$$

$$\lg\delta = a_{14} + b_{14}t_i + c_{14}t_i^2 + d_3t^3; \quad (64)$$

$$\lg\psi = a_{15} + b_{15}t_i + c_{15}t_i^2 + d_4t^3. \quad (65)$$

11.5.9. Значения пределов прочности и текучести, а также относительных удлинения и сужения для вероятности p = 0,5 при температуре t определяются по уравнениям (58) – (61) или (62) – (65) с использованием значений коэффициентов, полученных по пунктам 11.5.7 или 11.5.8.

11.5.10 Для значений вероятности разрушения, отличной от p = 0,5, значения характеристик механических свойств стали (сплава) при температуре t определяются по формулам (54) – (57).

11.5.11 Точность определения пределов прочности и текучести по данному методу в диапазоне температур испытаний составляет ±3%.

11.5.12 Для материалов после наработки устанавливаются приведенные характеристики прочности и пластичности:

$$\overline{\sigma}_в = \frac{\sigma_в}{\sigma'_в}; \ \overline{\sigma}_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma'_{0,2}}; \ \overline{HB} = \frac{HB}{HB'}; \ \overline{\delta} = \frac{\delta}{\delta'}; \ \overline{\psi} = \frac{\psi}{\psi'}; \ \overline{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Здесь α – ударная вязкость, а значок ′ означает, что берется усредненное или базовое кратковременное значение характеристики.

11.5.13 Оценка результатов наработки производится по формуле

$$H = \overline{\sigma}_в \, S = \overline{\sigma}_в \frac{a\overline{\delta} + b\overline{\psi} + c\overline{\alpha}}{3}. \quad (66)$$

Показателем результатов наработки является степень различия $\overline{\sigma}_в$ и H. В первом приближении коэффициенты *a*, b и c можно принять равными 1.

Приложение А

(*справочное*)

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Если рассматривать ползучесть как термически активируемый процесс, то для него уравнение состояния представляется в виде произведения экспоненты и τ экспоненциального множителя типа

$$B = f(\sigma, T)\exp\left[-\frac{U(\sigma, T)}{RT}\right], \qquad (A.1)$$

где B – какой-либо исследуемый параметр металла (например, $\tau_к$, $\tau_{\delta c}$, $\delta_к$, $\psi_к$, $\delta_р$);

σ – напряжение, МПа;

T – температура, К;

U – эффективная энергия активации процесса ползучести;

R – газовая постоянная.

Этот вид обосновывается с точки зрения как термомеханики, так и физики твердого тела.

Уточняются закономерности изучаемого явления, показывается, что выражения для f и U можно конкретизировать и от уравнения (А.1) перейти к зависимости

$$B = \alpha\, T^n\, \sigma^r \exp\left(\frac{b + c\sigma^k}{T} + d\sigma\right), \qquad (A.2)$$

где α, b, c, d – расчетные коэффициенты;

$r = f_1(T)$;

n и k – дискретно меняющиеся коэффициенты.

Если в формуле (А.2) положить $k = 1$, $d = 0$, $r = \frac{m}{T}$ (здесь m – пошагово меняющаяся константа), то получается выражение

$$B = \alpha T^{n} \sigma^{\frac{m}{T}} \exp\left(\frac{b + c\sigma}{T}\right), \qquad (A.3)$$

на котором базируются многие изложенные в настоящих Методических указаниях методы расчета и прогнозирования жаропрочных свойств.

Так, уравнения основной части настоящих Методических указаний (1), (3), (5), (6), (11), (13), (14), (19), (22), (23), (25) – (27), (45) следуют из формулы (А.3) после логарифмирования, уравнения (31), (44), (47) являются логарифмическими от небольших модификаций формулы (А.3). При этом некоторые расчетные коэффициенты могут фиксироваться.

Зависимость формулы (48) выводится из выражения (А.2) при $n = 0$, $k = 2$, $r = 2$.

Приложение Б

(*справочное*)

ПЕРЕЧЕНЬ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Б.1 КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ПО РАСЧЕТУ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНОСТИ

Б.1.1 Построение первичных кривых ползучести

Эта программа экстраполирует кривую деформации экспоненциальной зависимостью от времени (без учета стадии разрушения), рассчитывает ряд характеристик кривой при неизменных Т, σ и $\delta_н$ (таблица Б.1).

Б.1.2 Построение первичных кривых ползучести на основе уравнения Лакомба

Эта программа в отличие от программы Б.1.1 экстраполирует кривую деформации на всех стадиях с помощью модифицированного уравнения Лакомба, рассчитывает коэффициенты уравнения, суммарное удлинение во время испытаний, основную и остаточную дисперсию, комплекс величин, характеризующих деформационный процесс при неизменных Т, σ и $\delta_н$ (см. таблицу Б.1).

Б.1.3 Определение характеристик жаропрочности

Находится предел длительной прочности в зависимости от температуры и нагрузки. Вычисляются коэффициенты уравнения, связывающие эти величины, и проводятся по нему расчеты для пределов прочности, ползучести, остаточного удлинения, остаточного сужения, равномер-

Таблица Б.1

Марка стали (сплава)					Индекс партии				
Клеймо образца	Температура t, °С	Напряжение σ, МПа	Результаты испытаний						Примечание
			Суммарное удлинение при нагружении $\delta_{н}^{с}$, %	Упругое удлинение при нагружении $\delta_{н}^{у}$, %	Остаточное удлинение при нагружении $\delta_{н}$, %	Суммарное удлинение во время испытания $\delta_{в}^{с}$, %	Время измерения удлинения $\tau_{в}$, ч	Время до разрушения $\tau_{к}$, ч	

ного остаточного удлинения (см. разделы 3.3-3.8 настоящих Методических указаний).

Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22).

Б.1.4 Расчет уравнения состояния

Программа определяет скорость накопления деформации как функцию температуры, номинального напряжения, остаточного удлинения для двух видов испытаний — с постоянным напряжением или постоянной нагрузкой, находит коэффициенты уравнения (31), связывающего эти величины (см. раздел 3.9 настоящих Методических указаний), по нему проводятся расчеты.

Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22).

Б.1.5 Построение изохронных кривых ползучести и расчет релаксационной стойкости.

Программа ведет для заданного режима испытаний расчет времени, за которое накопится заданная деформация по трем формулам (32) – (34) для испытаний с постоянной нагрузкой, с постоянным напряжением, на релаксационную стойкость, коэффициенты в которых определены программой Б.1.4 (см. разделы 3.9 и 3.10 настоящих Методических указаний).

Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22).

Б.1.6 Расчет основных характеристик жаропрочности в параметрическом виде

Программа определяет эти характеристики с помощью введения промежуточных величин (параметров). Результаты используются также для построения параметричес-

ких диаграмм, дающих возможность по требуемым ресурсу и температуре вычислять значение искомой характеристики (предела длительной прочности, предела ползучести, предела остаточного удлинения, предела остаточного сужения, предела равномерного остаточного удлинения, времени равномерного удлинения). Соответствующие уравнения приведены в разделах 3.3-3.8 настоящих Методических указаний.

Примеры вида уравнений, построения параметрических кривых и нахождения по ним характеристик даны в приложении В.

Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22).

Б.2 РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЖАРОПРОЧНОСТИ

Определяются не только основные характеристики жаропрочности в обычном и параметрическом виде (аналогично программам Б.1.3 и Б.1.6), но и доверительные интервалы для их значений, что дает возможность оценивать предел длительной прочности и остаточный ресурс металла с вероятностной точки зрения. Соответствующие уравнения приведены в разделах 3.3-3.8 настоящих Методических указаний.

Данные берутся из таблиц 1 и 2 настоящих Методических указаний (см. пункты 2.22 и 3.3.2.6).

Б.3 РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА И ЕГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

По взаимосвязи между деформацией ползучести и повреждаемостью определяется время достижения более ранних стадий процесса разрушения. Вводятся различные

виды зависимости деформации от напряжения и степени поврежденности металла. Соответствующие уравнения приведены в разделе 6 настоящих Методических указаний.

Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22).

Б.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СВОЙСТВ ХРОМОМОЛИБДЕНОВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ

Б.4.1 Прогнозирование длительной прочности

Реализуется слегка усложненная по сравнению с программой Б.1.3 (квадратичная) зависимость характеристик длительной прочности от температуры и нагрузки, при этом часть коэффициентов зафиксирована — см. уравнение (48) настоящих Методических указаний. Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22).

Б.4.2 Экспрессный метод

На основе уравнения (48) настоящих Методических указаний вводится зависимость (50) для расчета времени до разрушения металла в условиях эксплуатации по результатам ускоренных испытаний. В программе используются данные таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22). Кроме того, в нее должны быть введены либо эксплуатационное напряжение, либо сведения для его расчета — см. формулу (49) настоящих Методических указаний.

Б.5. РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛА С УЧЕТОМ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

С помощью критерия прочности материала определяется уравнение для эквивалентного напряжения при различных типах напряженного состояния. Введение этого напряжения в выражение для долговечности металла позволяет найти температурно-временную зависимость конструктивной длительной прочности жаропрочных материалов (см. раздел 4 настоящих Методических указаний). Данные берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22). Кроме того, должны быть введены различного вида напряжения.

Б.6. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Программа дает возможность рассчитывать произвольные (линейные и нелинейные) регрессионные модели, по коэффициентам корреляции и остаточным дисперсиям оценивать влияние каждого фактора на изучаемую характеристику, находить соответствующие доверительные интервалы.

Сведения берутся из таблицы 1 настоящих Методических указаний (см. п. 2.22).

Приложение В

(рекомендуемое)

УНИФИКАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ПО ЖАРОПРОЧНОСТИ

В.1 Условные обозначения приняты согласно разделам 1.1; 2.1; 3.1; 5.1; 9.1 и 10.1 настоящих Методических указаний.

В.2 Результаты испытаний стали (сплава) на жаропрочность с измерением деформации образца по ГОСТ 3248-81 представлены в таблице 1 настоящих Методических указаний (см. пункт 2.22) и таблице Б.1 приложения Б, которые содержат все необходимые данные для расчетов характеристик жаропрочности.

В.3 Значения коэффициентов в формулах для определения условного предела длительной прочности (3), условного предела ползучести (11), условного предела удлинения (19), условного предела сужения (22), условного предела равномерного остаточного удлинения (25), ресурса равномерного остаточного удлинения и дисперсии соответствующих характеристик, определенные с помощью компьютера по программам приложения Б для лабораторных и нормативных характеристик, а также для предварительных нормативных характеристик крупных изделий индивидуального производства, помещаются в таблицу В.1.

В.4 Значения коэффициентов в формулах жаропрочности записываются с точностью до знака: $a_i = \pm 0{,}01$; $b_i = \pm 10$; $c_i = \pm 0{,}2$; $n = \pm 0{,}005$; $r = \pm 200$.

В.5 Расчетные формулы (3), (11), (19), (22), (25), (26) и уравнение состояния (31) записываются в следующем виде (пример записи):

– для условного предела прочности

$$\lg\tau_к = -27{,}33 + 2\lg T - (2400\lg\sigma - 24700 + 208{,}0\sigma)\cdot T^{-1};$$

Таблица В.1 – Коэффициенты формул для определения характеристик жаропрочности

Марка стали (сплава)		Количество партий	
Расчетная температура, °С		Приведенное напряжение, МПа	

Характеристика	Обозначение	Коэффициенты			Дисперсия S^2
		a	в	с	
Условный предел длительной прочности	$\sigma^t_{д.п,\tau_э}$				
Условный предел ползучести	$\sigma^t_{п-\delta_э,\tau_э}$				
Условный предел остаточного удлинения	$\delta^t_{к,\tau_э}$				
Условный предел остаточного сужения	$\psi^t_{к,\tau_э}$				
Условный предел равномерного остаточного удлинения	$\delta^t_{р,\tau_р}$				
Условный предел равномерного остаточного сужения	$\psi^t_{р,\tau_р}$				

– для условного предела ползучести

$$\lg \tau_{\delta c} = -23{,}40 + 2\lg T - (2400 \lg\sigma - 20750 + 228{,}0\sigma)T^{-1};$$

– для условного предела остаточного удлинения

$$\lg\delta_к = +3{,}04 - (800 \lg\sigma - 1090 + 65{,}0\sigma)\cdot T^{-1};$$

– для условного предела остаточного сужения

$$\lg\psi_к = +4{,}01 - (800 \lg\sigma + 2080 - 99{,}2\sigma)\cdot T^{-1};$$

– для условного предела остаточного равномерного удлинения

$$\lg\delta_р = +3{,}28 - (800 \lg\sigma - 1540 + 70{,}2\sigma)\cdot T^{-1};$$

– для времени равномерного удлинения

$$\lg\tau_р = -27{,}06 + 2 \lg T - (2400 \lg\sigma - 24420 + 208{,}0\sigma)\cdot T^{-1};$$

– для уравнения состояния

$$\lg \delta_в^п = +23{,}28 - 2 \lg T + (2400\lg\sigma_0 - 22550 + 57{,}0\sigma_0 - 14800\,\delta_в^п)\cdot T^{-1} - 0{,}185 \lg (\delta_н + \delta_в^п).$$

В.6 Значения лабораторных и нормативных характеристик, а также предварительных нормативных характеристик крупных изделий индивидуального производства, определенные по настоящим Методическим указаниям в соответствии с пунктом 1.13, заносятся в таблицу В.2. Значения характеристик жаропрочности определяются для диапазона температур от t_{min} до t_{max} через 10°С. Для соблюдения условий пункта 1.2.18 Методических указаний линии длительной прочности, соответствующие уровням температур t_{min} и t_{max}, на графике в координатах $\lg\delta_{д.п}$ – $\lg\tau$ должны находиться в области, ограниченной наибольшим и наименьшим значениями напряжений при испытаниях и ординатой $\tau_з$.

Таблица В.2 – Характеристика стали

Марка стали (сплава)		Количество партий	
Категория характеристик			

Характеристика	Обозначение	Температура, °С										
		20	$t_м$-70	$t_м$-60	$t_м$-50	$t_м$-40	$t_м$-30	$t_м$-20	$t_м$-10	$t_м$	$t_м$+10	$t_м$+20
Предел прочности	$\sigma_в$											
Предел текучести	$\sigma_{0,2}$											
Остаточное удлинение	δ											
Остаточное сужение	ψ											
Условный предел длительной прочности при 0,01 $\tau_з$	$\sigma^t_{д\,п,0,01\tau_з}$											
Условный предел длительной прочности при 0,1 $\tau_з$	$\sigma^t_{д.п,0,1\tau_з}$											
Условный предел длительной прочности при 0,5 $\tau_з$	$\sigma^t_{д.п,0,5\tau_з}$											
Условный предел длительной прочности при 1,0 $\tau_з$	$\sigma^t_{д.п,\tau_з}$											
Условный предел ползучести при $\delta_з$ = 0,5%	$\sigma^t_{п-0,5\tau_з}$											

Условный предел ползучести при $\delta_3 = 1{,}0\%$	$\sigma^t_{п-1{,}0\tau_з}$											
Условный предел ползучести при $\delta_3 = 2{,}0\%$	$\sigma^t_{п-2{,}0\tau_з}$											
Релаксационная стойкость	$\sigma^t_{рк,\tau_з}$											
Условный предел остаточного удлинения	$\delta^t_{к,\tau_з}$											
Условный предел остаточного сужения	$\psi^t_{к,\tau_з}$											
Условный предел равномерного остаточного удлинения	$\delta^t_{р,\tau_р}$											
Условный предел остаточного удлинения сужения	$\psi^t_{р,\tau_р}$											
Ресурс равномерного остаточного удлинения	$\delta^ф_{р,t,\tau_р}$											

В.7 Результаты определения жаропрочных свойств металла изделий при эксплуатации помещаются в таблицу В.3.

Таблица В.3 – Характеристика жаропрочности металла изделия при эксплуатации

Объект		Изделие	
Марка стали (сплава)		Наработка, ч	
Расчетная температура, °С		Приведенное напряжение, МПа	

Характеристика	Обозначение	Температура		
Предел прочности	$\sigma_в$	t_1	$t_м$	t_2
Предел текучести	$\sigma_{0,2}$			
Относительное удлинение	δ			
Относительное сужение	ψ			
Условный предел длительной прочности	$\sigma^{t}_{д.пт^{э}_{д_1}}$			
Дополнительный ресурс (по $\sigma_{д.п}$)	$\tau^{э}_{д_1}$			
Условный предел относительного удлинения	$\delta^{t}_{д.пт^{э}_{д2}}$			
Время равномерной деформации	$\tau_р$			
Условный предел равномерного остаточного удлинения	$\delta^{t}_{р,\tau_р}$			
Допустимое остаточное удлинение	$\delta_д$			
Дополнительный ресурс (по $\delta_д$)	$\tau^{э}_{д_2}$			
Принимаемый дополнительный ресурс	$\tau^{э}_{д}$			

В.8 Характеристики жаропрочности стали (сплава) любой категории могут быть представлены в виде графиков.

В.9 Обобщенная параметрическая диаграмма жаропрочности.

В.9.1 Результаты всех испытаний на жаропрочность, проведенных по планам и обработанных в соответствии с разделом 3 настоящих Методических указаний, рекомендуется представлять в виде параметрической диаграммы в координатах $P - \lg\delta$ (рисунок В.1). По обобщенной диаграмме можно определять условные пределы длительной прочности, ползучести и характеристик длительной пластичности.

В.9.2 Построение параметрических кривых основано на формулах (3), (11), (19), (22), (25) и (26) настоящих Методических указаний. Эти формулы можно записать в параметрическом виде:

– для условных пределов длительной прочности

$$P_{д.п} = [0{,}4343\ (b_1 + c_1\sigma) - m \lg\sigma] \cdot 10^{-3}, \qquad (В.1)$$

где коэффициенты b_1 и c_1 принимаются согласно пункту 3.3.1.2, а m – согласно пункту 3.3.1 настоящих Методических указаний;

– для условных пределов ползучести

$$P_{п} = [0{,}4343\ (b_2 + c_2\sigma) - m \lg\sigma] \cdot 10^{-3}, \qquad (В.2)$$

где коэффициенты b_2 и c_2 принимаются согласно пункту 3.4.1.2, а m – согласно пункту 3.3.1 настоящих Методических указаний;

– для условных пределов остаточного удлинения

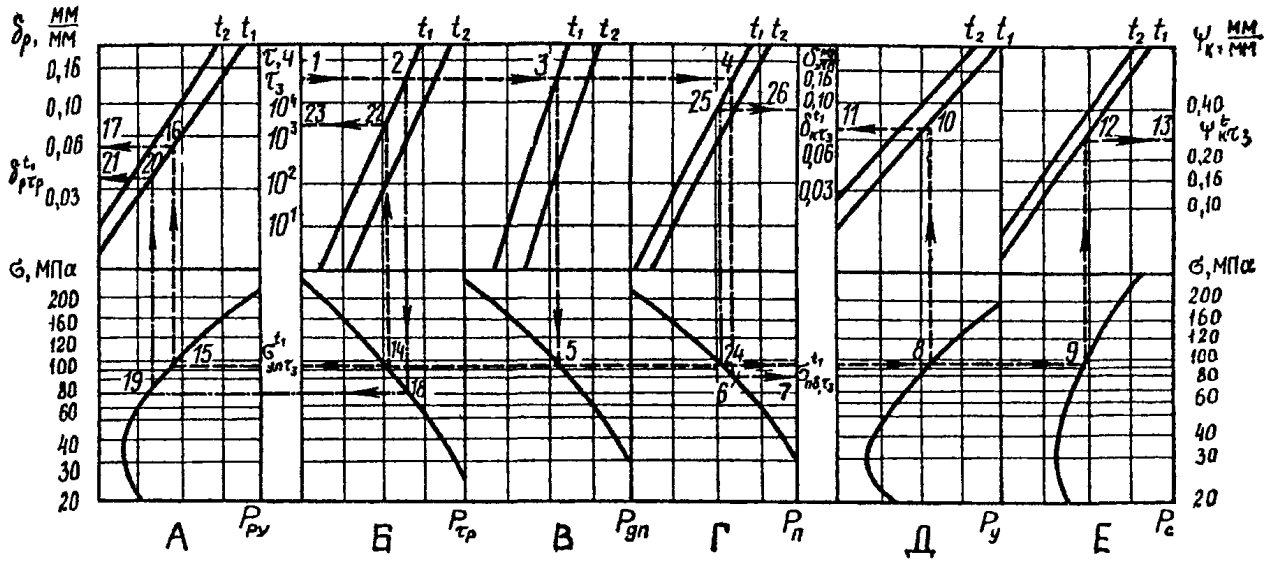
$$P_{у} = [0{,}4343\ (b_3 + c_3\sigma) - m \lg\sigma] \cdot 10^{-3}, \qquad (В.3)$$

где коэффициенты b_3 и c_3 принимаются согласно пункту 3.5.3, а m – согласно пункту 3.5.1 настоящих Методических указаний;

– для условных пределов остаточного сужения

$$P_{с} = [0{,}4343\ (b_4 + c_4\sigma) - m \lg\sigma] \cdot 10^{-3}, \qquad (В.4)$$

где коэффициенты b_4 и c_4 принимаются согласно пункту 3.6.3, а m – согласно пункту 3.5.1 настоящих Методических указаний;



А – равномерное остаточное удлинение; Б – время равномерного удлинения; В – длительная прочность; Г – ползучесть; Д – остаточное удлинение, Е – остаточное сужение

Рисунок В.1 – Обобщенная параметрическая диаграмма жаропрочности

– для условных пределов равномерного остаточного удлинения

$$P_{р\,у} = [0{,}4343\ (b_5 + c_5\sigma) - m \lg \sigma] \cdot 10^{-3}, \qquad (В.5)$$

где коэффициенты b_5 и c_5 принимаются согласно пункту 3.7.3, а m – согласно пункту 3.5.1 настоящих Методических указаний;

– для условных пределов равномерной деформации

$$P_{\tau_р} = [0{,}4343\ (b_6 + c_6\sigma) - m \lg \sigma] \cdot 10^{-3}, \qquad (В.6)$$

где коэффициенты b_6 и c_6 принимаются согласно пункту 3.7.6, а m – согласно пункту 3.3.1 настоящих Методических указаний.

В.9.2.1 По формуле (В.1) рассчитывается значение параметра длительной прочности: задается ряд значений номинальных напряжений, определяются значения параметра $P_{A\,п}$ и по этим данным строится параметрическая кривая (В на рисунке В.1).

В.9.2.2 По формуле (В.2) рассчитываются значения параметра ползучести $P_п$ для заданного значения остаточного удлинения $\delta_з$ и строится параметрическая кривая ползучести (Г на рисунке В.1).

В.9.2.3 По формуле (В.3) рассчитываются значения параметра остаточного удлинения $P_у$ и строится параметрическая кривая остаточного удлинения (Д на рисунке В.1).

В.9.2.4 По формуле (В.4) рассчитываются значения параметра $P_с$ и строится параметрическая кривая остаточного сужения (Е на рисунке В.1).

В.9.2.5 По формуле (В.5) рассчитываются значения параметра $P_{р.у}$ и строится параметрическая кривая равномерного остаточного удлинения (А на рисунке В.1).

В.9.2.6 По зависимости параметра времени равномерной деформации $P_{\tau_р}$ от напряжения, которая получается из формулы (В.6), рассчитываются значения параметра и строится параметрическая кривая времени равномерной деформации (Б на рисунке В.1).

В.9.3 В верхней половине обобщенной параметрической диаграммы помещаются температурно-временные или температурно-деформационные номограммы, отражающие зависимость параметра от логарифма времени или логарифма деформационной характеристики при заданной температуре.

Для подсчета значений параметра при построении номограмм используются формулы:

— для условных пределов длительной прочности

$$P_{A\,п} = T\,(\lg\tau - 2\lg T - 0{,}4343a_1)\cdot 10^{-3}, \qquad (В.7)$$

где коэффициент a_1 принимается согласно пункту 3.3.1.2 настоящих Методических указаний;

— для условных пределов ползучести

$$P_{п} = T\,(\lg\tau - 2\lg T - 0{,}4343a_2)\cdot 10^{-3}, \qquad (В.8)$$

где коэффициент a_2 принимается согласно пункту 3.4.1.2 настоящих Методических указаний;

— для условных пределов остаточного удлинения

$$P_{у} = T\,(\lg\delta - 0{,}4343a_3)\cdot 10^{-3}, \qquad (В.9)$$

где коэффициент a_3 принимается согласно пункту 3.5.3 настоящих Методических указаний;

— для условных пределов остаточного сужения

$$P_{с} = T\,(\lg\psi - 0{,}4343a_4)\cdot 10^{-3}, \qquad (В.10)$$

где коэффициент a_4 принимается согласно пункту 3.6.3 настоящих Методических указаний;

— для условных пределов равномерного остаточного удлинения

$$P_{р\,у} = T\,(\lg\delta - 0{,}4343a_5)\cdot 10^{-3}, \qquad (В.11)$$

где коэффициент a_5 принимается согласно пункту 3.7.1 настоящих Методических указаний;

— для времени равномерного удлинения

$$P_{\tau_р} = T\,(\lg\tau - 2\lg T - 0{,}4343a_6)\cdot 10^{-3}, \qquad (В.12)$$

где коэффициент a_6 принимается согласно пункту 3.7.6 настоящих Методических указаний.

В.9.3.1 По формуле (В.7) для выбранного ряда значений времени и заданных уровней температуры рассчитываются значения параметра $P_{А.п}$ и в координатах $P_{А.п} - \lg\tau$ строятся линии номограммы (В на рисунке В.1).

В.9.3.2 По формуле (В.8) для выбранного ряда значений времени и заданных уровней температуры рассчитываются значения параметра $P_{п}$ и в координатах $P_{п} - \lg\tau$ строятся линии номограммы (Г на рисунке В.1).

В.9.3.3 По зависимости параметра остаточного удлинения $P_{у}$ от температуры и удлинения, которая получается из формулы (В.9), рассчитываются значения параметра для выбранного ряда значений удлинения и заданных уровней температуры и в координатах $P_{у} - \lg\delta$ строятся линии номограммы (Д на рисунке В.1).

В.9.3.4 По зависимости параметра остаточного сужения $P_{с}$ от температуры и сужения, которая получается из формулы (В.10), рассчитываются значения параметра для выбранного ряда значений сужения и заданных уровней температуры и в координатах $P_{с} - \lg\psi$ строятся линии номограммы (Е на рисунке В.1).

В.9.3.5 По зависимости параметра остаточного равномерного удлинения $P_{р.у}$ от температуры и удлинения, которая получается из формулы (В.11), рассчитываются значения параметра для выбранного ряда значений удлинения и заданных уровней температуры и в координатах $P_{р.у} - \lg\delta$ строятся линии номограммы (А на рисунке В.1).

В.9.3.6 По зависимости параметра времени равномерного удлинения $P_{\tau_р}$ от температуры и времени, которая получается из формулы (В.12), рассчитывается значение параметра для выбранного ряда значений времени и заданных уровней температуры и в координатах $P_{\tau_р} - \lg\tau$ строятся линии номограммы (Б на рисунке В.1).

В.9.4 Характеристики прочности и пластичности определяются по обобщенной параметрической диаграмме следующим образом.

В.9.4.1 Условный предел длительной прочности определяется по диаграмме В (на рисунке В.1). По значению заданного ресурса $\tau_з$ проводится горизонталь 1-3 до пересечения с линией номограммы, соответствующей заданной температуре t_1. От точки 3 проводится вертикаль 3-5 до пересечения с линией диаграммы длительной прочности. Ордината точки 5 будет являться искомым значением условного предела длительной прочности.

В.9.4.2 Проводится горизонталь 1-3-4 по линии параметрической диаграммы Г аналогично пункту В.9.4.1 и находится условный предел ползучести (линия 4-6-7).

В.9.4.3 По горизонтали 15-5-8-9 определяются условные пределы остаточного удлинения (линия 5-8-10-11), остаточного сужения (линия 5-8-9-12-13) и равномерного остаточного удлинения (линия 5-15-16-17).

В.9.4.4 По линии 24-25-26 диаграммы Г можно определить значение времени, за которое относительное удлинение достигает значения $\tau_з$ при температуре t_1 и напряжении, равном условному пределу длительной прочности.

В.9.4.5 Ордината точки 18 на диаграмме Б соответствует значению напряжения, при котором в течение всего заданного ресурса $\tau_з$ будет иметь место равномерное удлинение, значение которого при $\tau_з$ определяется линией 18-19-20-21.

В.9.4.6 С помощью обобщенной параметрической диаграммы можно получать данные для построения первичных и изохронных кривых ползучести для заданной температуры.

Строится серия параметрических кривых (типа Г на рисунке В.1) для разных значений $\delta_з$. Сечением этих кривых горизонтальной прямой, аналогичной прямой 5-24-8, получаются данные для построения первичных кривых ползучести при σ = const. Сечением этих кривых вертикальной прямой, аналогичной прямой 4-6, получаются данные для построения изохронных кривых при τ = const.

Приложение Г

(*справочное*)

БАНК ДАННЫХ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Г.1 Банк содержит данные примерно по 2 тыс. отечественных и 21 тыс. иностранных марок машиностроительных материалов, в него занесены стали различного класса (конструкционные, инструментальные, коррозионно-стойкие, жаростойкие, для отливок, специальные), более 100 видов чугунов, 400 сплавов, в первую очередь применяющихся в энергетике, металлургии, транспорте, тяжелом машиностроении. Он включает сведения о химических, физических, механических и эксплуатационных свойствах материалов, фирмах-производителях и поставщиках продукции, видах поставки, аналогах, технологических характеристиках, всего более чем по 300 параметрам.

Г.2 Информационный банк данных постоянно актуализируется, непрерывно пополняясь и модифицируясь. При сопровождении банка частота его модификации определяется заказчиком.

Г.3 Банк открыт для пользователя, который может самостоятельно пополнять или корректировать его, максимально приспосабливая к собственным запросам.

Г.4 В системе реализованы прямые запросы (поиск свойств какого-либо материала) и обратные запросы (выбор материалов, удовлетворяющих условиям, наложенным на их характеристики). Число условий практически не ограничено.

Г.5 Система позволяет компактно распечатывать на принтере любую необходимую информацию, осуществляет ее копирование, обеспечивает защиту и безопасность данных.

Г.6 Система является диалоговой и, несмотря на достаточно сложную структуру, чрезвычайно проста в работе. Пользоваться банком и модифицировать его можно научиться за несколько часов.

Г.7 Все данные банка сопровождаются указанием на источник информации. Использовано свыше 800 таких источников от государственных и отраслевых стандартов до литературных данных и рекомендаций.

Г.8 Банк данных можно использовать на любых типах современных персональных компьютеров. Система поставляется в режиме OFF-LINE на дискетах и может быть установлена и задействована на ПЭВМ заказчика.

Г.9 Объем системы порядка 45 Мбайт. Она уже успешно используется на энергетических, металлургических и машиностроительных предприятиях, в отраслевых НИИ.

Содержание

1 Общие положения 4
2 Объем испытаний 11
3 Аналитический метод обработки данных планируемых испытаний 23
4 Оценка влияния вида сложного напряженного состояния на долговечность жаропрочных материалов 46
5 Метод определения долговечности и длительной прочности металла в условиях взаимодействия ползучести и малоцикловой усталости 49
6 Определение характеристик пластичности и оценка остаточного ресурса по степени поврежденности металла 53
7 Экспрессный метод определения предела длительной прочности металла (сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и 25Х1М1Ф) в эксплуатации 56
8 Контроль и оценка жаропрочных свойств стали (сплава) 58
9 Оценка жаропрочности металла изделий при эксплуатации 60
10 Определение условного предела длительной прочности при дополнительном ресурсе 63
11 Определение механических свойств 65
Приложение А Основное уравнение долговечности 69
Приложение Б Перечень и краткая характеристика компьютерных программ математической обработки результатов испытаний 71
Приложение В Унификация представления данных по жаропрочности 77
Приложение Г Банк данных по энергетическим и машиностроительным материалам 89

Подписано к печати 28.01.2005
Печать ризография Уч.-изд. л. 5,8 Тираж 200 экз
Заказ № 644 Издат. № 03-64

ЦПТИ ОРГРЭС
107023, Москва, Семеновский пер , д. 15

gost.e-ecolog.ru