ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
СОЮЗА ССР

РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ

ГОСТ 25.501—78

Издание официальное

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ
Москва

gost.e-ecolog.ru

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
СОЮЗА ССР

РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ

ГОСТ 25.501—78

Издание официальное

МОСКВА — 1979

РАЗРАБОТАН Государственным комитетом СССР по стандартам

ИСПОЛНИТЕЛИ

Р. Н. Рыньков, В. М. Нестеров, Л. В. Пущин, Г. П. Гузенков, Н. А. Алимова

Министерством путей сообщения

ИСПОЛНИТЕЛИ

Е. А. Шур, А. В. Великанов, Н. Я. Бычкова

Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности

ИСПОЛНИТЕЛИ

С. В. Пинегин, А. В. Орлов, М. В. Коровчинский

Министерством автомобильной промышленности

ИСПОЛНИТЕЛИ

О. Н. Черменский, В. Г. Пискарева

Министерством высшего и среднего специального образования

ИСПОЛНИТЕЛИ

Д. Н. Решетов, Г. А. Снесарев

ВНЕСЕН Государственным комитетом СССР по стандартам

Член Госстандарта Б. Н. Лямин

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1978 г. № 3385

УДК 620.178.32:006.354 Группа Т51

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

РАСЧЕТЫ И ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Методы испытаний на контактную усталость

Design calculations and strength testings in machinebuildings. Procedures of contact failure testings

ГОСТ 25.501—78

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1978 г. № 3385 срок введения установлен

с 01.01.1980 г.

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт устанавливает методы контрольных и исследовательских испытаний машиностроительных материалов на контактную усталость и обработки их результатов.

Стандарт не устанавливает методы испытаний на контактную усталость деталей машин и испытаний в условиях пониженной и повышенной температуры окружающей среды, вакуума и лучевого воздействия.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Стандарт предусматривает четыре схемы нагружения:

качение без проскальзывания (черт. 1);

качение с проскальзыванием (черт. 2);

качение с внешней касательной нагрузкой (черт. 3);

пульсирующий контакт (черт. 4).

1.2. Метод предусматривает испытания на контактную усталость в условиях:

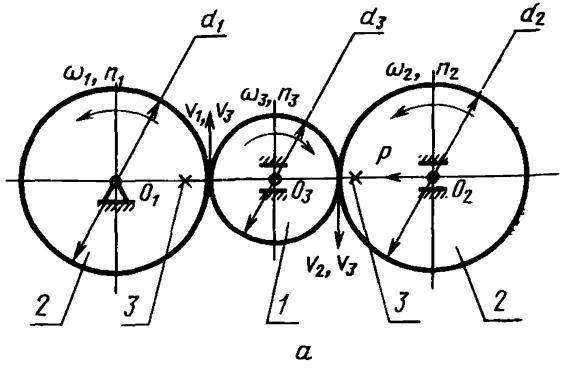
нормальной температуры и влажности окружающей среды в соответствии с ГОСТ 15150—69 (исполнение У, категория 4.2);

наличия или отсутствия смазки.

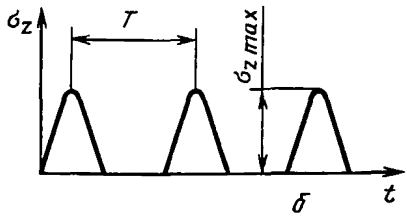
1.3. Термины, определения и обозначения, применяемые в стандарте, указаны в обязательном приложении 1.

1.4. По результатам испытаний на контактную усталость производят:

Качение без проскальзывания



а



б

а — схема нагружения; *б* — цикл напряжений; *1* — образец;
2 — контртела; *3* — приводные элементы; $T_ц$ — период цикла.

$$\lambda_{c_e} = \frac{v_3 - v_1}{v_3} = \frac{v_3 - v_2}{v_3} = 0$$ — относительная величина проскальзывания;

$$d_1 = d_2;\ n_1 = n_2;\ \omega_1 = \omega_2;\ v_1 = v_2 = v_3 = \frac{\pi d_1 n_1}{1000 \cdot 60};$$

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30};\qquad \omega_2 = \frac{\pi n_2}{30};\qquad \omega_3 = \frac{\omega_1 d_1}{d_3} = \frac{\omega_2 d_2}{d_3};$$

d_1, d_2, d_3 — диаметры рабочей части контртел и образца, мм;
n_1, n_2, n_3 — скорости вращения контртел и образца, мин $^{-1}$;
$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — угловые скорости контртел и образца, рад/с;
v_1, v_2, v_3 — окружные скорости рабочей части контртел и образца, м/с.

Привод на контртела осуществляется через дифференциальное устройство.

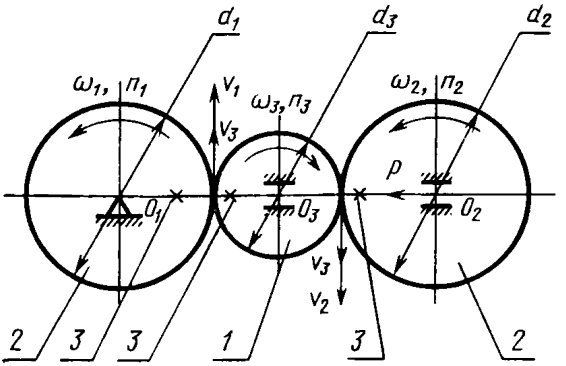
Черт. 1

построение кривой контактной усталости и определение предела контактной выносливости при ограниченном объеме партии;

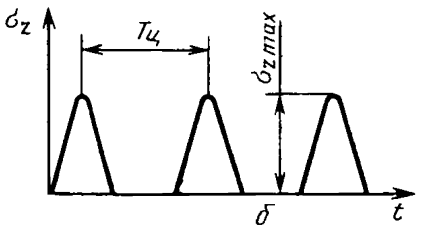
оценку параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения;

построение группы кривых контактной усталости по параметру вероятности разрушения;

Качение с проскальзыванием



а



б

а — схема нагружения; *б* — цикл напряжений; *1* — образец; *2* — контртела; *3* — приводные элементы; $T_ц$ — период цикла.

$$\lambda_{c_3} = \frac{v_3 - v_1}{v_3} = \frac{v_3 - v_2}{v_3} \neq 0;$$

$$d_1 = d_2;\ n_1 = n_2;\ \omega_1 = \omega_2;\ v_1 = v_2;$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_1 d_1}{(1-\lambda_{c_3}) d_3} = \frac{\omega_2 d_2}{(1-\lambda_{c_3}) d_3};$$

$$n_3 = \frac{30\omega_2 d_2}{\pi(1-\lambda_{c_3}) d_3};\quad v_3 = \frac{\omega_3 d_3}{2000}.$$

Черт. 2

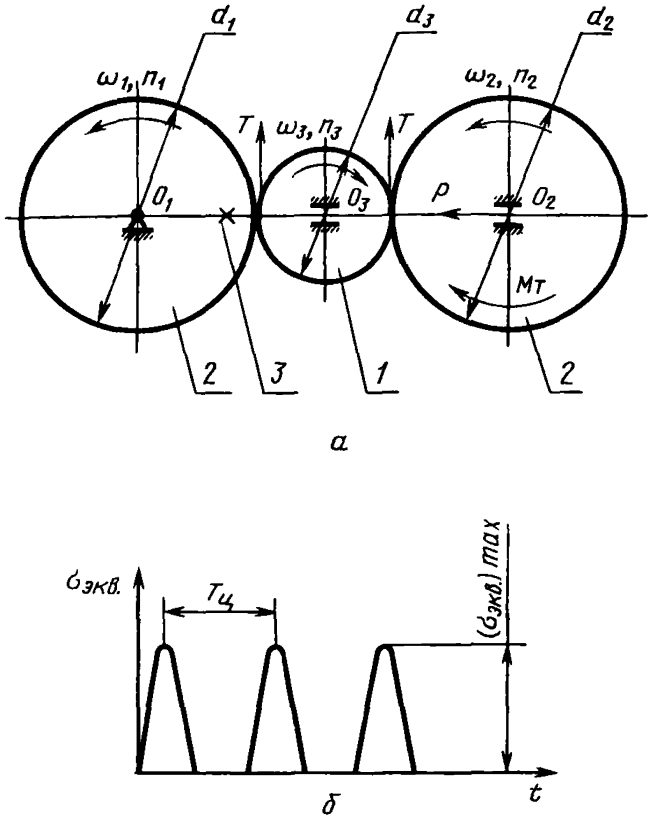
оценку среднего значения предела контактной выносливости и его среднеквадратического отклонения.

1.5. Контактно-усталостные характеристики, определяемые в настоящем стандарте, могут быть использованы:

при выборе металлов и сплавов и обоснований конструктивно-технологических решений;

при контроле качества металлов;

Качение с внешней касательной нагрузкой



а — схема нагружения; *б* — цикл напряжений; *1* — образец; *2* — контртела; *3* — приводной элемент; $T_ц$ — период цикла

$d_1=d_2$; $M_т=T\cdot\frac{d_2}{2}$ — тормозной момент;

T — касательная нагрузка.

Черт. 3

при расчетах на этапе проектирования деталей машин, работающих при циклическом контактном нагружении.

1.6. Расчет максимальных нормальных напряжений в зоне контакта.

1.6.1. Максимальное нормальное напряжение вычисляют по формулам:

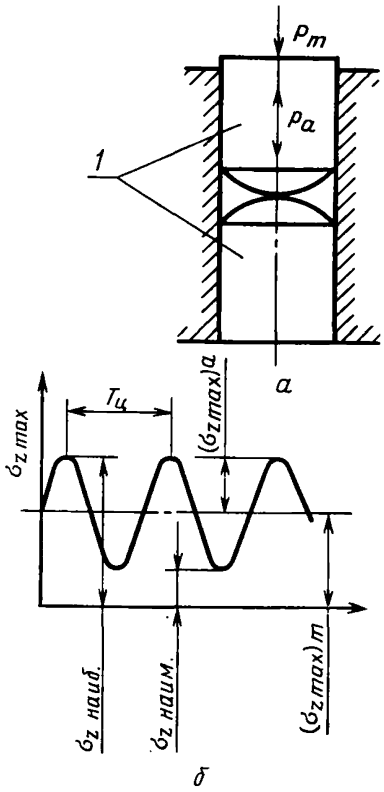
для круговой площадки контакта (черт. 5, *а*)

$$\sigma_{zmax}=\frac{0{,}478P}{a^2}\ ; \qquad (1)$$

для эллиптической площадки контакта (черт. 5, *б*)

$$\sigma_{zmax}=\frac{0{,}478P}{a\cdot b}\ ; \qquad (2)$$

Пульсирующий контакт



а — схема нагружения; *б* — цикл напряжений; *1* — образцы; $T_ц$ — период цикла.

Черт. 4

для контакта по полоске (черт. 5, *в*)

$$\sigma_{z\max} = \frac{0{,}637P}{l \cdot b}, \qquad (3)$$

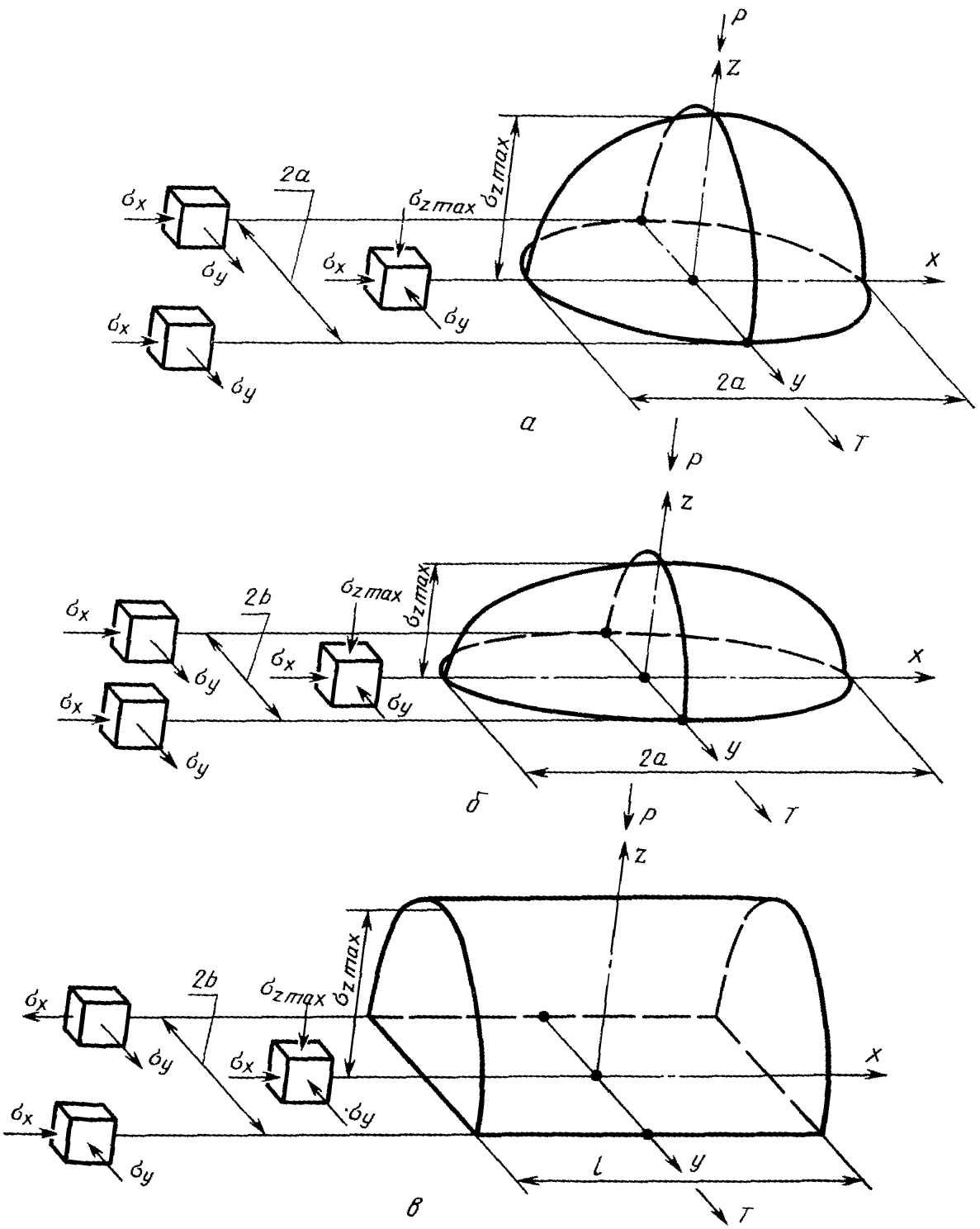
где P — нормальная нагрузка, Н (кгс) (см. приложение 1);

a и b — размеры большой и малой полуоси площадки контакта, соответственно, мм;

l — длина полоски контакта, мм.

1.6.2. Формулы для вычисления полуосей площадки контакта (a и b) и максимального нормального напряжения ($\sigma_{z\max}$) для основных случаев контактирования образцов и контртел с одинаковыми упругими характеристиками (одинаковые модули нормаль-

Распределение напряжений на площадках контакта



Черт. 5

ной упругости $E_1=E_2=2{,}15\cdot10^4$ кгс/мм^2=$21{,}08\cdot10^4$ МПа и коэффициенты Пуассона $\mu_1=\mu_2=0{,}3$) приведены в рекомендуемом приложении 2.

1.6.3. При неодинаковых упругих характеристиках образцов и контртел размеры полуосей площадки контакта (a и b) и максимальное нормальное напряжение вычисляют по формулам, приведенным в пп. 1.6.4—1.6.6.

1.6.4. Для круговой и эллиптической площадок контакта

$$a=1{,}145n_a\left(\frac{\eta P}{\Sigma\rho}\right)^{1/3}; \qquad (4)$$

$$b=1{,}145n_b\left(\frac{\eta P}{\Sigma\rho}\right)^{1/3}; \qquad (5)$$

$$\sigma_{z\max}=0{,}365n_\sigma\left[P\left(\frac{\Sigma\rho}{\eta}\right)^2\right]^{1/3}, \qquad (6)$$

где η — коэффициент, учитывающий упругие характеристики материалов контактирующих тел, вычисляемый по формуле

$$\eta=\frac{1-\mu_1}{E_1}+\frac{1-\mu_2}{E_2},$$

где μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона материалов образца и контртела;

E_1 и E_2 — модули нормальной упругости материалов образца и контртела;

$\Sigma\rho=\rho_{11}+\rho_{12}+\rho_{21}+\rho_{22}$ — сумма главной кривизны поверхностей соприкасающихся тел в точке первоначального контакта, то есть величин, обратных радиусам кривизны $\rho=\frac{1}{R}$;

ρ_{11} и ρ_{12} — главная кривизна первого тела (черт. 6) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;

ρ_{21} и ρ_{22} — главная кривизна второго тела (см. черт. 6).

Кривизна ρ положительна, если поверхность выпуклая, и отрицательна — если поверхность вогнутая;

n_a, n_b, n_σ — коэффициенты, учитывающие кривизну поверхностей упругих тел в районе касания и определяемые по табл. 3 справочного приложения 3 в зависимости от величины Ω.

Величину Ω определяют по приложению 2 или по формуле

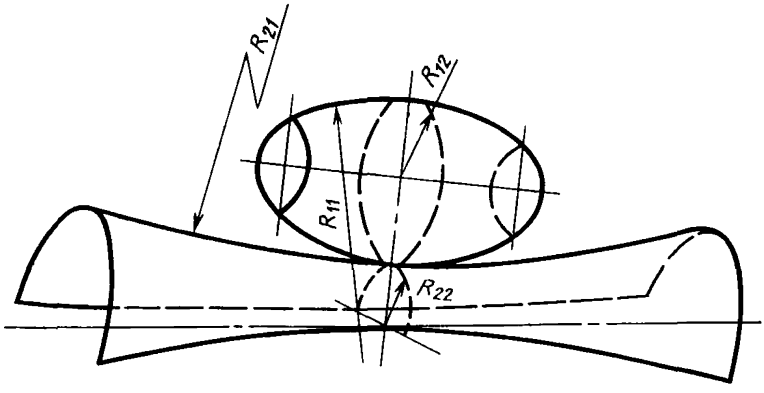
$$\Omega=\frac{/(\rho_{11}-\rho_{21})-(\rho_{12}-\rho_{22})/}{\Sigma\rho}. \qquad (7)$$

1.6.5. Для контакта по полоске при сжатии цилиндра диаметром d с плоскостью величины b и $\sigma_{z\max}$ вычисляют по формулам:

$$b=0{,}7979\left(\frac{P\eta d}{l}\right)^{1/2}; \qquad (8)$$

$$\sigma_{z\max}=0{,}7979\left(\frac{P}{\eta l d}\right)^{1/2}. \qquad (9)$$

Контакт поверхностей двойной кривизны



Черт. 6

1.6.6. Для контакта по полоске при сжатии цилиндра диаметром d с выпуклой «плюс» и охватывающей «минус» цилиндрической поверхностью диаметром D величины b и $\sigma_{z\max}$ вычисляют по формулам

$$b=0{,}7979\left[\frac{P\eta Dd}{l(D\pm d)}\right]^{1/2}; \qquad (10)$$

$$\sigma_{z\max}=0{,}7979\left[\frac{P(d\pm D)}{\eta l Dd}\right]^{1/2}. \qquad (11)$$

1.6.7. При контактировании поверхностей переменной кривизны, когда площадка контакта имеет сложную форму, отличную от эллиптической, но симметричную относительно оси x, максимальное нормальное напряжение ($\sigma_{z\max}$) вычисляют по формуле

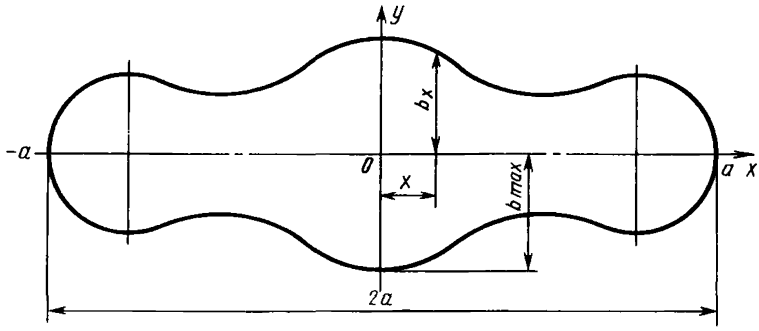
$$\sigma_{z\max}=\frac{0{,}637Pb_{\max}}{\int\limits_{-a}^{a} b_x^2 dx}, \qquad (12)$$

где P — см. п. 1.6.1 и приложение 1;
$a, b_x, b_{\max}$ — см. п. 1.6.1 и черт. 7.

Значение интеграла $\int\limits_{-a}^{a} b_x^2 dx$ определяют методами численного интегрирования по экспериментально полученному отпечатку площадки контакта.

Примечание. Пример расчета напряжений $\sigma_{z\max}$ с учетом формоизменений, вызванных пластическими деформациями, приведен в рекомендуемом приложении 4.

Площадка контакта сложной формы



$y=f(x)$; $x=0$; $y=y_{max}=b_{max}$; $X=x$; $y=b_x$

Черт. 7

1.6.8. Для материалов с неизвестными упругими характеристиками E, μ значение коэффициента (η) вычисляют по формуле

$$\eta=1{,}33\frac{a^3}{PR}, \qquad (13)$$

где P — см. п. 1.6.1 и приложение 1;

a — размер полуоси площадки контакта, полученный для данного сочетания материалов при сжатии шара радиусом R с плоскостью.

При одинаковом материале обоих тел ($\mu_1=\mu_2=0{,}3$) значение модуля нормальной упругости (E) вычисляют по формуле

$$E=1{,}36\frac{PR}{a^3}. \qquad (14)$$

1.7. Расчет эквивалентных напряжений

1.7.1. Для схемы нагружения качения с внешней касательной нагрузкой расчет производят по эквивалентным напряжениям $\sigma_{экв}$.

Определение эквивалентного напряжения производят для наиболее напряженной точки, лежащей на конце малой полуоси площадки контакта (см. черт. 5).

1.7.2. При совместном действии нормальной нагрузки и касательной нагрузки относительные напряжения на поверхности площадки контакта ($\bar{\sigma}_x$ и $\bar{\sigma}_y$) вычисляют по формулам:

$$\bar{\sigma}_x=\bar{\sigma}_x^{(P)}+\bar{\sigma}_x^{(T)}; \qquad (15)$$

$$\bar{\sigma}_y=\bar{\sigma}_y^{(P)}+\bar{\sigma}_y^{(T)}, \qquad (16)$$

где $\bar{\sigma}_x^{(P)}$; $\bar{\sigma}_y^{(P)}$ — относительные напряжения от действия нормальной нагрузки P;

$\bar{\sigma}_x^{(T)}$; $\bar{\sigma}_y^{(T)}$ — относительные напряжения от действия касательной нагрузки T.

1.7.3. Относительные напряжения для точки, совпадающей с концом малой полуоси, вычисляют по формулам

для круговой площадки контакта

$$\bar{\sigma}_x^{(P)} = -\frac{(1-2\mu)}{3}, \tag{17}$$

$$\bar{\sigma}_y^{(P)} = -\bar{\sigma}_x^{(P)}, \tag{18}$$

$$\bar{\sigma}_x^{(T)} = \frac{3\pi K}{8}\mu, \tag{19}$$

$$\bar{\sigma}_y^{(T)} = \frac{\pi\mu}{8}(4+\mu); \tag{20}$$

для эллиптической площадки контакта

$$\bar{\sigma}_x^{(P)} = \frac{(1-2\mu)\beta}{e^2}\left[\frac{\beta}{e}\operatorname{arctg}\left(\frac{e}{\beta}\right)-1\right], \tag{21}$$

$$\bar{\sigma}_y^{(P)} = -\bar{\sigma}_x^{(P)}, \tag{22}$$

$$\bar{\sigma}_x^{(T)} = \frac{2K\mu\beta^2}{e^2}(I_x - I_y), \tag{23}$$

$$\bar{\sigma}_y^{(T)} = -2K\beta^2\left[I_y + \frac{\mu}{e^2}(I_x - \beta^2 I_y)\right]; \tag{24}$$

для контакта по полоске

$$\bar{\sigma}_x^{(P)} = \bar{\sigma}_y^{(P)} = 0, \tag{25}$$

$$\bar{\sigma}_x^{(T)} = 2K^2, \tag{26}$$

$$\bar{\sigma}_y^{(T)} = 2K. \tag{27}$$

В формулах (17—27):

μ — см. п. 1.6.4;

e; $\beta = \frac{B}{a}$ — см. рекомендуемое приложение 2;

$K = \frac{T}{P}$ — см. обязательное приложение 1;

$I_x = \frac{1}{e^2}[F(e) - E(e)]$ — интегральная функция;

$I_y = \frac{1}{e^2}\left[\frac{E(e)}{1-e^2} - F(e)\right]$ — интегральная функция;

$F(e) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\psi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\psi}}$ — эллиптический интеграл первого рода, определяемый по табл. 4, приложения 3;

$E(e) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-e^2\sin^2\psi}\, d\psi$ — эллиптический интеграл второго рода, определяемый по табл. 4, приложения 3.

1.7.4. При заданной величине $\sigma_{z\max}$ значения нормальных напряжений (σ_x и σ_y) вычисляют по формулам:

$$\sigma_x=\bar{\sigma}_x\cdot\sigma_{z\max}, \quad (28)$$

$$\sigma_y=\bar{\sigma}_y\cdot\sigma_{z\max}. \quad (29)$$

1.7.5. Для двухосного состояния определяют главные напряжения:

$$\sigma_1=\sigma_y;\ \sigma_2=0;\ \sigma_3=\sigma_x.$$

1.7.6. Расчет эквивалентного напряжения, разработанный институтом проблем прочности АН УССР производят по формуле

$$\sigma_{экв}=\chi\sigma_i+(1-\chi)\sigma_1\cdot A^{1-I}, \quad (30)$$

где χ — коэффициент, характеризующий степень участия сдвиговой деформации в микроразрушении материала, равный $\chi=\frac{\sigma_{вр}}{\sigma_{вс}}$;

$\sigma_{вр}$ — временное сопротивление материала при растяжении, определяемое по ГОСТ 1497—73;

$\sigma_{вс}$ — временное сопротивление материала при сжатии, определяемое по рекомендуемому приложению 5;

$\sigma_i=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}$ — интенсивность напряжения;

$I=\frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{\sigma_i}$ — параметр напряженного состояния;

A — параметр структуры материала, вычисляемый по формуле

$$A=\frac{\varphi-\sqrt{3\chi}}{1-\chi},$$

где $\varphi=\frac{\sigma_{вр}}{\tau_{пч}}$,

где $\tau_{пч}$ — предел прочности материала при кручении, определяемый по ГОСТ 3565—58.

1.7.7. Пример расчета напряженного состояния в зоне контакта и аналитического описания левой ветви кривой контактной усталости для схемы качения с внешней касательной нагрузкой приведен в рекомендуемом приложении 6.

2. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. Оборудование для испытаний на контактную усталость должно удовлетворять следующим основным требованиям:

моделировать схемы нагружения (п. 1.1, черт. 1—4);

обеспечивать постоянство подачи смазочного материала;

автоматически выключаться при резком увеличении или уменьшении нагрузки или при прекращении подачи смазочного материала;

автоматически выключаться и фиксировать, согласно принятому критерию разрушения, момент выкрашивания на рабочей поверхности образца.

2.2. Абсолютная погрешность фиксации момента разрушения не должна превышать ±0,5% значения измеряемой величины.

2.3. Суммарная погрешность нагружения образца нормальной нагрузкой P не должна превышать:

±3% значения измеряемой величины — для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 1—3;

±5% значения измеряемой величины — для схемы пульсирующий контакт (п. 1.1, черт. 4).

2.4. Суммарная погрешность нагружения образца касательной нагрузкой T не должна превышать ±5% значения измеряемой величины.

2.5. Погрешность заданного коэффициента проскальзывания λ_{C_2} не должна превышать ±5% значения измеряемой величины.

2.6. Погрешность задания частоты нагружения образца не должна превышать ±5% значения измеряемой величины.

2.7. Допускается калибровка испытательного оборудования в статике с расчетной оценкой динамической погрешности (до введения государственного стандарта на методы поверки метрологических характеристик при динамических режимах).

2.8. Для проведения контрольных испытаний образцов на контактную усталость применяют следующее испытательное оборудование:

для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 1 и 3, — машина типа МКВ-КМ;

для пульсирующего контакта (п. 1.1, черт. 4) — гидропульсационные и резонансные усталостные машины;

для качения с проскальзыванием (п. 1.1, черт. 2)—машина для испытаний на трение и износ модели СМЦ-2 в пределах характеристики, указанной в сопроводительной документации на машину.

Примечание. Требования настоящего раздела на машину модели СМЦ-2 не распространяются.

2.9. При исследовательских испытаниях образцов на контактную усталость допускается применять другие испытательные машины, удовлетворяющие целям и условиям испытания.

2.10. Испытательное оборудование изготовляют по стандартам и техническим условиям на него, утвержденным в установленном порядке.

2.11. Описание испытательной машины типа МКВ-КМ приведено в рекомендуемом приложении 7.

3. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Нагружение образцов при испытаниях производят:

при постоянных заданных амплитудах напряжений цикла

$\sigma_a = \sigma_{z\max}$ — для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 1, 2;

$\sigma_a = (\sigma_{экв})_{\max}$ — для качения с внешней касательной нагрузкой (п. 1.1, черт. 3);

для схемы пульсирующий контакт (п. 1.1, черт. 4) — при соблюдении подобия циклов, то есть при одновременном пропорциональном изменении среднего напряжения цикла $(\sigma_{z\max})_m$ и амплитуды $(\sigma_{z\max})_a$ или при постоянном для всех образцов среднем напряжении цикла $(\sigma_{z\max})_m$;

при постоянном заданном коэффициенте $K = \frac{T}{P}$ — для схемы качения с внешней касательной нагрузкой (п. 1.1, черт. 3);

при постоянной заданной относительной величине проскальзывания — для схемы качения с проскальзыванием (п. 1.1, черт. 2).

3.2. В пределах намеченной серии испытаний схема нагружения, способ подвода, количество смазочного материала и критерий разрушения должны быть одинаковыми.

3.3. Испытание каждого образца проводится на новой дорожке обкатывающего цилиндрического контртела.

3.4. В пределах намеченной серии испытаний смазывание образцов должно осуществляться маслом одной марки с периодической проверкой соответствия масла требованиям стандартов или технических условий на него.

3.5. Частота циклов нагружения в пределах намеченной серии испытаний должна быть постоянна и регламентируется от 30 до 1000 Гц.

Если при заданной частоте температура в зоне контакта вызывает изменение структуры и физико-механических свойств металла, то частоту необходимо уменьшить.

3.6. Для построения кривой контактной усталости и определения предела контактной выносливости число образцов в партии должно быть не менее 12.

В интервале напряжений 0,95—1,05 от значения предела контактной выносливости испытывают не менее трех образцов, причем

не менее половины из них не должно разрушаться до базового числа циклов.

3.7. Число образцов при оценке параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения определяют по ГОСТ 17510—72, исходя из вида закона распределения. При логарифмически нормальном законе распределения минимальное число образцов определяют следующим образом:

задают ожидаемое значение среднеквадратического отклонения логарифма числа циклов $S_{\ln N}$ (разд. 6) и определяют коэффициент вариации $V_{\ln N}$ из соотношения $V^2_{\ln N}=\exp(S^2_{\ln N})-1$;

по значению $V_{\ln N}$ находят соответствующее значение R по табл. 1 справочного приложения 3;

задают величину относительной погрешности δ среднего значения $\lg N$ с доверительной вероятностью β;

по значениям δ и β находят значение Q по табл. 2 приложения 3;

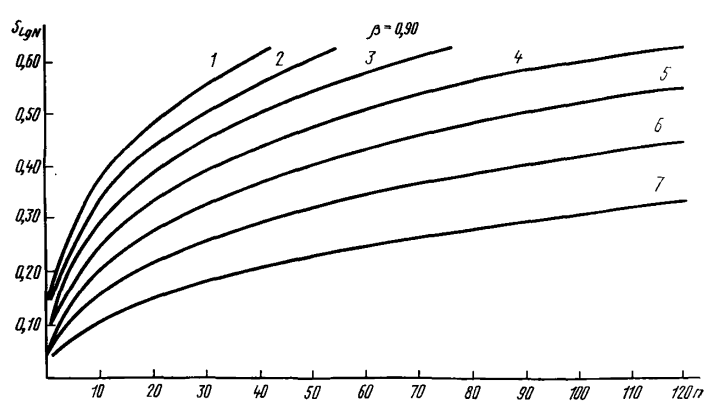
по найденным значениям R и Q вычисляют минимальное число образцов (n) по формуле

$$n=R\cdot Q. \qquad (31)$$

Если по результатам испытаний получен коэффициент вариации меньший или равный заданному, то испытания прекращают. Если же коэффициент больше заданного, то точность не достаточна и необходимо провести дополнительные испытания.

На черт. 8, 9 приведены графики выбора числа образцов для наиболее распространенных значений $S_{\lg N}$, δ и β.

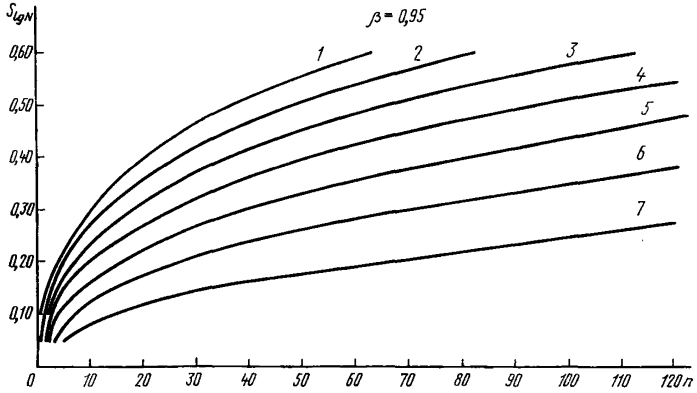
График выбора числа образцов



1—δ=40%; *2*—δ=35%; *3*—δ=30%; *4*—δ=25%; *5*—δ=20%; *6*—δ=15%; *7*—δ=10%.

Черт. 8

График выбора числа образцов



1 — δ=40%; *2* — δ=35%; *3* — δ=30%; *4* — δ=25%; *5* — δ=20%; *6* — δ=15%; *7* — δ=10%.

Черт. 9

3.8. Число образцов для построения кривой контактной усталости в статистическом аспекте определяют, исходя из п. 3.7 и числа уровней напряжений (см. п. 5.11).

3.9. Число образцов при оценке параметров функции распределения предела контактной выносливости определяют по ГОСТ 17510—72, исходя из нормального закона распределения.

Число образцов должно быть не менее 30.

3.10. В случаях, предусмотренных пп. 3.6 и 3.9, база испытаний при определении предела контактной выносливости должна быть не ниже:

10^7 циклов — для металлов и сплавов с твердостью HB$\leqslant$200, имеющих горизонтальный участок на кривой контактной усталости;

$5{,}0 \cdot 10^7$ циклов — для металлов и сплавов с твердостью HRC$<$40, имеющих горизонтальный участок на кривой контактной усталости;

10^8 циклов — для металлов и сплавов с HRC$>$40, имеющих горизонтальный участок на кривой контактной усталости;

$2 \cdot 10^8$—$5 \cdot 10^8$ циклов — для металлов и сплавов, не имеющих горизонтального участка на кривой контактной усталости.

3.11. При оценке параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения допускается проводить испытания образцов на ограниченной базе.

Значения базы испытаний $N_б$ вычисляют по формуле

$$N_б = (1{,}5 - 2{,}0)\overline{N}_{ож}, \qquad (32)$$

где $\overline{N_{ож}}$ — среднее ожидаемое значение числа циклов нагружений для заданного уровня напряжений.

3.12. В качестве расчетного напряжения в зоне контакта принято максимальное нормальное напряжение $\sigma_{z\max}$ для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 1, 2 и 4.

При испытании образцов по схеме качения с внешней касательной нагрузкой (пп. 1.1, черт. 3) в качестве расчетного принято эквивалентное напряжение $\sigma_{экв}$.

Вычисление $\sigma_{z\max}$ и $\sigma_{экв}$ производят по формулам, приведенным в разд. 1.

3.13. Выбор уровней напряжений должен обеспечивать в процессе испытаний постоянство размеров и формы площадки контакта. Если этого достигнуть не удается, то уточненный расчет напряжений $\sigma_{z\max}$ производят по п. 1.6.7, исходя из переменной кривизны контактных поверхностей.

3.14. Выбор ориентировочного значения $\sigma_{z\max}$ при испытании образцов на верхнем уровне кривой контактной усталости производят или по априорной информации о результатах испытаний аналогичных образцов или по табл. 1.

Таблица 1

Твердость образца	$\sigma_{z\max}$, МПа (кгс/мм²)	
	для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 1 и 3	для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 2 и 4
От HB200 до HRC30 включ.	2000 (200)	1500 (150)
Св. HRC30 „ HRC35 „	3000 (300)	2000 (200)
„ HRC35 „ HRC40 „	3500 (350)	2300 (230)
„ HRC40 „ HRC45 „	4000 (400)	2600 (260)
„ HRC45 „ HRC50 „	4500 (450)	3000 (300)
„ HRC50 „ HRC55 „	5000 (500)	3300 (330)
„ HRC55 „ HRC60 „	5500 (550)	3600 (360)
„ HRC60 „ HRC65 „	6000 (600)	4000 (400)

Примечание. Значения $\sigma_{z\max}$, приведенные в табл. 1, справедливы для круговой и эллиптической площадок контакта. Для контакта по полоске значения $\sigma_{z\max}$ уменьшают на 20%.

3.15. Выбор коэффициента K при испытании образцов по схеме качения с внешней касательной нагрузкой (п. 1.1, черт. 3) производят из условия обеспечения минимального проскальзывания между образцом и контртелом.

Рекомендуемый диапазон значений коэффициента K составляет от 0,02 до 0,05.

3.16. Основным критерием разрушения при определении пределов контактной выносливости и построения кривых контактной усталости является:

для схем нагружения, предусмотренных п. 1.1, черт. 1—3 — наличие на контактной поверхности нескольких ямок выкрашивания

или единичного выкрашивания диаметром, превышающим 50% малой полуоси пятна контакта;

для схемы «пульсирующий контакт» — наличие на контактной поверхности усталостных трещин, возникающих у контура пятна контакта. Форма контура усталостных трещин зависит от геометрических размеров образца и контртела.

3.17. За момент разрушения принимают момент резкого изменения площади выкрашивания контактной поверхности.

Момент разрушения фиксируют или при помощи специальной аппаратуры или по результатам обработки графика изменения площади выкрашивания в функции наработки (числа циклов нагружений).

Измерение длины усталостной трещины или диаметра выкрашивания (в случаях, когда применение специальной аппаратуры не представляется возможным) производят оптическими средствами измерения.

3.18. Рекомендуемая конструкция электронного автоматического выключателя приведена в рекомендуемом приложении 8.

3.19. При исследовательских испытаниях допустимо применять критерии разрушения, отличные от приведенных в пп. 3.16 и 3.17.

3.20. Нагружение образцов при испытаниях на контактную усталость производят по одной из схем, указанных на черт. 1—4.

4. МЕТОДЫ ОТБОРА ОБРАЗЦОВ

4.1. Контрольные испытания на контактную усталость

4.1.1. Для проведения одной серии испытаний образцы должны быть изготовлены из металла одной марки и плавки по одному технологическому процессу.

4.1.2. Технологический процесс получения заготовки, маркировки и изготовления образцов не должен оказывать существенного влияния на контактно-усталостные свойства исходного материала.

4.1.3. В пределах одной серии испытаний макро- и микроструктура, а также твердость образцов должны быть близкими. Предельное отклонение по твердости не должно превышать HB±5 или HRC±0,5.

4.1.4. Термическая обработка металла должна производиться до финишных операций изготовления образцов.

Поверхностному упрочнению должны подвергаться окончательно изготовленные образцы.

4.1.5. Точность изготовления образцов и контртел должна быть не ниже 6-го квалитета СТ СЭВ 145—75.

4.1.6. Шероховатость поверхности рабочей части образцов должна быть $R_a \leqslant 0{,}32$ мкм по ГОСТ 2789—73, на поверхности не должно быть следов коррозии, окалины, литейных корок, вальцовоч-

ных хлопьев, цветов побежалости, трещин и других дефектов.

4.1.7. Рабочую часть образца измеряют с погрешностью не более 0,01 мм.

4.1.8. Выбор типов образцов и контртел производят по табл. 2.

Таблица 2

Схема нагружения	Верхний уровень напряжения $\sigma_{z\max}$, МПа (кгс/мм²)	Тип образца и контртела
Качение без проскальзывания Качение с внешней касательной нагрузкой	До 3000 (до 300) " 6000 (" 600)	I II
Качение с проскальзыванием	—	III
Пульсирующий контакт	—	IV

4.1.9. Примеры рабочих чертежей образцов и контртел типов I—IV приведены в рекомендуемом приложении 9.

4.2. При исследовательских испытаниях форма и размеры образцов и контртел, шероховатость поверхности, отклонение по твердости и другие параметры настоящим стандартом не регламентируются.

5. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. В пределах намеченной серии:

образцы испытывают на однотипных машинах;

последовательность установки, закрепления и нагружения образцов должна быть одинаковой.

5.2. Установка и закрепление образцов в испытательной машине не должны вызывать больших дополнительных напряжений от биения и несоосности образцов и захватов.

5.3. Нагружение образцов производят плавно после того, как будет достигнута заданная частота нагружения.

5.4. Испытание образцов рекомендуется проводить непрерывно до разрушения или до базового числа циклов.

5.5. В процессе испытаний контролируется стабильность задаваемых нагрузок, температуры и подачи смазочного материала.

5.6. Перед испытаниями производится настройка аппаратуры для фиксации момента разрушения. Критерий разрушения для настройки аппаратуры определяется в соответствии требованиям пп. 3.16 и 3.17.

5.7. Исходные данные и результаты испытаний каждого образца записывают в протокол испытаний (рекомендуемое приложение 10), а результаты испытаний партии образцов — в сводный

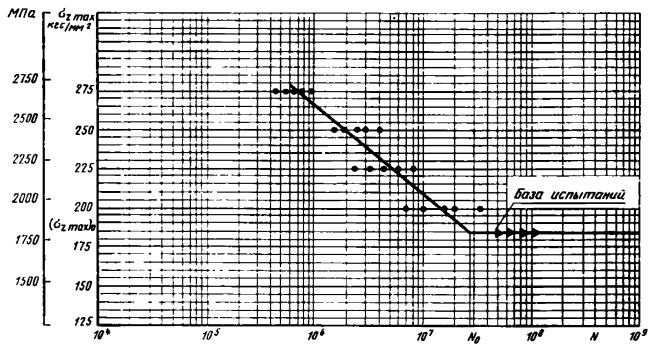
протокол испытаний (рекомендуемое приложение 11).

Протоколы испытаний являются обязательными первичными документами, не подлежащими уничтожению в пределах установленных сроков хранения документации.

5.8. Кривые контактной усталости строят в полулогарифмических координатах; ординаты—наибольшие значения напряжений цикла $\sigma_{наиб}$, абсциссы — логарифмы чисел циклов до разрушения $\lg N$ (черт. 10) или в двойных логарифмических координатах

$$\lg(\sigma_{наиб}) - \lg N$$

Кривая контактной усталости



Черт. 10

5.9. Кривые контактной усталости при пульсирующем контакте строят для партии одинаковых образцов, испытанных при одинаковых средних напряжениях цикла $(\sigma_{z\max})_m$ или при одинаковых коэффициентах асимметрии.

5.10. При построении кривой контактной усталости при ограниченном объеме партии, на 3—4 уровнях напряжений, превышающих предел контактной выносливости, испытывают партию одинаковых образцов (см. п. 3.6) до разрушения или базового числа циклов (см. п. 3.10).

Результаты испытаний подвергают регрессионному анализу (см. рекомендуемое приложение 12).

5.11. Для оценки параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения испытывают партию одинаковых образцов (см. п. 3.7) до разрушения или базового числа циклов (см. пп. 3.10, 3.11). Результаты испытаний подвергают статистической оценке (см. раздел. 6).

5.12. Для построения кривой контактной усталости в статистическом аспекте, на 3—5 уровнях напряжений, превышающих предел контактной выносливости, испытывают партию одинаковых образцов (см. п. 3.8) до разрушения или базового числа циклов (см. пп. 3.10, 3.11). Результаты испытаний подвергают статистической оценке (см. разд. 6) и регрессионному анализу (см. приложение 12).

5.13. Для оценки среднего значения предела контактной выносливости и его среднеквадратического отклонения испытывают методом ступенчатого увеличения напряжений партию одинаковых образцов (см. п. 3.9) до разрушения или до базового числа циклов (см. п. 3.10). Последовательность проведения испытаний методом ступенчатого увеличения напряжений приведена в рекомендуемом приложении 13.

5.14. При обработке результатов рекомендуется учитывать накопленную пластическую деформацию следующим образом: по п. 1.6.7 определяют уточнение (с учетом формоизменений, вызванных пластическими деформациями) значения $\sigma_{z\max}$; по уточненным значениям $\sigma_{z\max}$ строят дополнительную кривую контактной усталости с учетом пластической деформации.

6. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

6.1. Оценка параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения

6.1.1. Данный метод устанавливает оценку параметров, основанную на логарифмически-нормальном распределении.

В обоснованных случаях допускается применять распределение Вейбулла, экспоненциальное, гамма-распределение и др.

6.1.2. Для заданного уровня напряжений составляют вариационный ряд ресурсов (чисел циклов) и производят первичную статистическую обработку, порядок которой указан в табл. 3.

Таблица 3

j	P_j	U_{P_j}	$U^2_{P_j}$	N_j	$\lg N_j$	$\lg N_j \cdot U_{P_j}$
1	P_1	U_{P_1}	$U^2_{P_1}$	N_1	$\lg N_1$	$\lg N_1 \cdot U_{P_1}$
2	P_2	U_{P_2}	$U^2_{P_2}$	N_2	$\lg N_2$	$\lg N_2 \cdot U_{P_2}$
.						
.						
.						
n	P_n	U_{P_n}	$U^2_{P_n}$	N_n	$\lg N_n$	$\lg N_n \cdot U_{P_n}$
		$\sum_{j=1}^{n} U_{P_j}$	$\sum_{j=1}^{n} U^2_{P_j}$		$\sum_{j=1}^{n} \lg N_j$	$\sum_{j=1}^{n} \lg N_j \cdot U_{P_j}$

Примечание. j—номер образца в вариационном ряду ресурсов (чисел циклов), причем

$$N_1 \leqslant N_2 \leqslant \ldots \leqslant N_{j-1} \leqslant N_j \leqslant N_{j+1} \leqslant \ldots \leqslant N_n;$$

P_j — выборочная вероятность, вычисляемая по формуле

$$P_j = \frac{j-0{,}5}{n} \text{ (при } n>20)$$

или по табл. 5 приложения 3 (при $n \leqslant 20$);

n — число образцов, испытанных на заданном уровне напряжения;

U_{P_j} — квантиль нормального распределения, определяемый по табл. 6 приложения 3;

N_j — число циклов до разрушения j-го образца.

6.1.3. Определяют параметры эмпирического распределения величины $\lg N_j$, среднее значение логарифма чисел циклов $\overline{\lg N}$, соответствующее выборочной вероятности разрушения $P=0{,}50$ и среднеквадратическое отклонение $S_{\lg N}$.

Порядок определения этих величин следующий: прямую, аппроксимирующую функцию распределения логарифмов чисел циклов, выражают уравнением

$$\lg N_{P_j} = \overline{\lg N} + U_{P_j} \cdot S_{\lg N}. \qquad (33)$$

Используя данные табл. 3 методом наименьших квадратов определяют $\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$ в уравнении (33).

При разрушении всех образцов на заданном уровне напряжения $\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$ вычисляют по формулам:

$$\overline{\lg N} = \frac{\sum\limits_{j=1}^{n} \lg N_j}{n}; \qquad (34)$$

$$S_{\lg N} = \frac{\sum\limits_{j=1}^{n} U_{P_j} \cdot \lg N_j}{\sum\limits_{j=1}^{n} U^2_{P_j}}, \qquad (35)$$

При неразрушении части партии образцов (испытания на ограниченной базе) на заданном уровне напряжения, $\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$ вычисляют по формулам:

$$\overline{\lg N}=\frac{\sum\limits_{j=1}^{l}\lg N_j\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}^2-\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}\lg N_j}{l\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}^2-\left(\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}\right)^2}; \tag{36}$$

$$S_{\lg N}=\frac{l\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}\lg N_j-\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}\sum\limits_{j=1}^{l}\lg N_j}{l\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}^2-\left(\sum\limits_{j=1}^{l}U_{P_j}\right)^2}, \tag{37}$$

где l — число образцов, испытанных на заданном уровне напряжения до разрушения.

6.1.4. Если в вариационном ряду ресурсов (чисел циклов) один или несколько результатов вызывают сомнение в принадлежности их к рассматриваемой выборке, используют 3σ — критерий для непринятия резко выделяющихся наблюдений.

Если значения ресурсов выходят за пределы интервала $\overline{\lg N}\pm 3S_{\lg N}$, то с доверительной вероятностью $\beta=0{,}997$ можно утверждать, что эти значения не принадлежат к рассматриваемой выборке.

6.1.5. Проверку нормальности распределения логарифмов чисел циклов производят по критерию χ^2 — Пирсона. Методика проверки приведена в РС СЭВ 1483—68.

6.1.6. Определяют доверительные интервалы, то есть находят по выборочным значениям $\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$ наименьшие интервалы, в которых с заранее заданной вероятностью или надежностью будут находиться значения математического ожидания a и дисперсии σ^2.

Доверительный интервал для математического ожидания вычисляют по формуле

$$\overline{\lg N}-\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}t_{\beta k}\leqslant a\leqslant\overline{\lg N}+\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}t_{\beta k}, \tag{38}$$

где $\overline{\lg N}-\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}t_{\beta k}$ и $\overline{\lg N}+\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}t_{\beta k}$ — нижняя и верхняя границы доверительного интервала для математического ожидания, соответственно;

$t_{\beta k}$ — критерий Стьюдента, определяемый по табл. 7 приложения 3, для доверительной вероятности β и числа степеней свободы $k=n-1$. Уровни доверительной вероятности β принимают обычно равными 0,90 или 0,95.

Нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала для стандартного отклонения вычисляют по формулам:

$$S_{\lg N}\psi_1\sqrt{\frac{n-1}{n}}\ll\sigma\ll S_{\lg N}\psi_2\sqrt{\frac{n-1}{n}}, \qquad (39)$$

где $\sigma_н=S_{\lg N}\cdot\psi_1\sqrt{\frac{n-1}{n}}$ и $\sigma_в=S_{\lg N}\psi_2\sqrt{\frac{n-1}{n}}$ — нижняя и верхняя границы доверительного интервала для стандартного отклонения, соответственно;

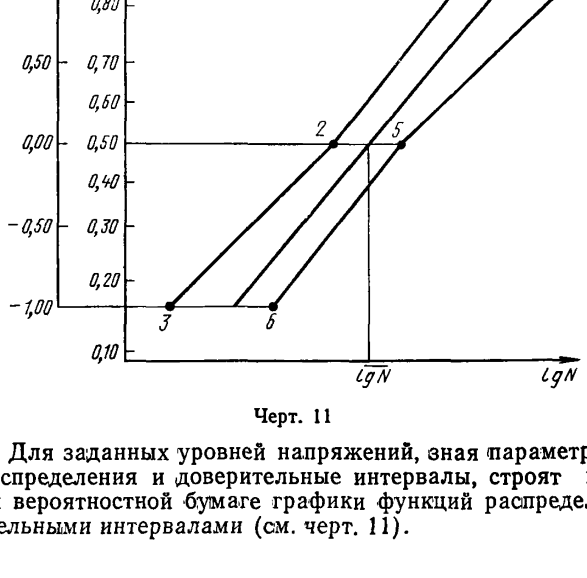
ψ_1 и ψ_2 — коэффициенты, определяемые по табл. 9 приложения 3 в зависимости от заданной доверительной вероятности и числа степеней свободы.

Границы доверительного интервала для дисперсии вычисляют по формуле

$$\sigma^2_н\ll\sigma^2\ll\sigma^2_в. \qquad (40)$$

6.1.7. Значения координат для построения доверительных интервалов функции распределения ресурса приведено в табл. 4, расположение точек показано на черт. 11.

График функции распределения с доверительными интервалами



Черт. 11

6.1.8. Для заданных уровней напряжений, зная параметры функций распределения и доверительные интервалы, строят на нормальной вероятностной бумаге графики функций распределения с доверительными интервалами (см. черт. 11).

Таблица 4

Номер точки	Значение ординаты		Значение абсциссы
	P_j	U_{P_j}	
1	84,10	1,00	$\overline{\lg N}+(S_{\lg N}\,\psi_1\sqrt{\frac{n-1}{n}}-\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}\,t_{\beta k})$
2	50,00	0,00	$\overline{\lg N}-\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}\,t_{\beta k}$
3	15,90	1,00	$\overline{\lg N}-(S_{\lg N}\,\psi_2\sqrt{\frac{n-1}{n}}+\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}\,t_{\beta k})$
4	84,10	1,00	$\overline{\lg N}+(S_{\lg N}\,\psi_2\sqrt{\frac{n-1}{n}}+\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}\,t_{\beta k})$
5	50,00	0,00	$\overline{\lg N}+\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}\,t_{\beta k}$
6	15,90	—1,00	$\overline{\lg N}-(S_{\lg N}\psi_1\sqrt{\frac{n-1}{n}}-\frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}}\,t_{\beta k})$

6.1.9. Пример оценки параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения приведен в рекомендуемом приложении 14.

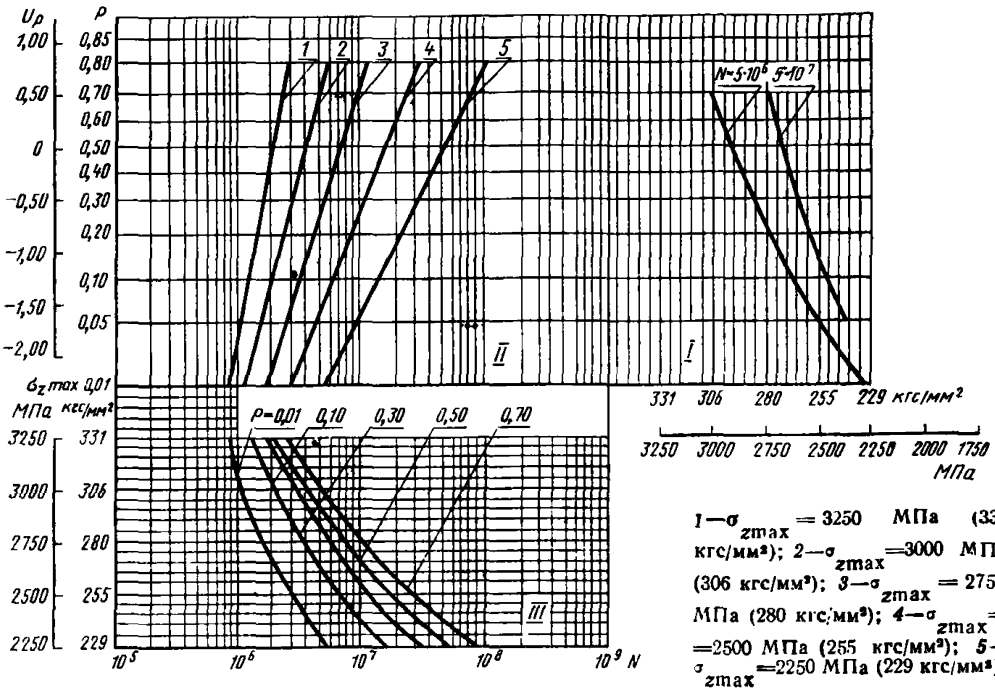
6.1.10. Статистический анализ результатов сравнительных испытаний приведен в рекомендуемом приложении 15.

6.2. По графикам (черт. 12, II квадрант), задаваясь определенной вероятностью разрушения, находят числа циклов, соответствующие заданной вероятности разрушения и напряжению, и строят кривые контактной усталости для различных уровней вероятности разрушения (черт. 12, III квадрант).

Уровни вероятности разрушения принимают равными: 0,01; 0.10; 0,30; 0,50; 0,70.

6.3. По графикам (см. черт. 12, II и III квадранты), задаваясь определенными числами циклов, получают данные для построения кривых, характеризующих вероятности разрушения от уровня напряжений (черт. 12, I квадрант).

Вероятностная диаграмма контактной усталости



1—$\sigma_{z\max}$ = 3250 МПа (331 кгс/мм²); 2—$\sigma_{z\max}$ =3000 МПа (306 кгс/мм²); 3—$\sigma_{z\max}$ = 2750 МПа (280 кгс/мм²); 4—$\sigma_{z\max}$ = =2500 МПа (255 кгс/мм²); 5—$\sigma_{z\max}$ =2250 МПа (229 кгс/мм²).

Черт. 12

6.4. Аналитическое описание левой ветви кривой контактной усталости методом регрессионного анализа приведено в приложении 12.

6.5. Методика статистической обработки результатов испытаний методом ступенчатого увеличения напряжений для оценки среднего значения предела контактной выносливости и его среднеквадратического отклонения приведена в приложении 13.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Обязательное

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

1. Цикл напряжений, выносливость, база испытаний, кривая усталости, предел выносливости, функция распределения долговечности, кривая усталости равной вероятности разрушения, функция распределения предела выносливости, номинальное напряжение — по ГОСТ 2860—77.

2. Вариационный ряд, нормальное и логарифмически нормальное распределение, среднее значение и среднее квадратическое отклонение, математическое ожидание, стандартное отклонение, дисперсия, выборочная вероятность, доверительный интервал, уровень доверительной вероятности, уровень значимости, квантиль нормального распределения — по РС СЭВ 1483—68.

3. Контактная усталость — процесс накопления повреждений и развития разрушения поверхностных слоев материала под действием переменных контактных напряжений, вызывающих образование ямок выкрашивания (питтинг) или трещин и снижение долговечности.

4. Основные обозначения величин, необходимых для проведения испытаний на контактную усталость, приведены в таблице.

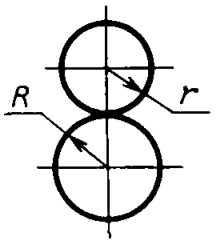
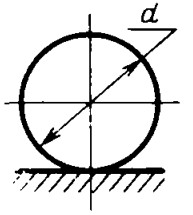
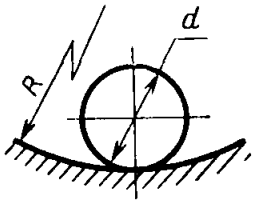
Наименование величины	Обозначение	Единица величины	Примечание
Нормальная нагрузка	P	Н (кгс)	Черт. 1—3
Касательная нагрузка	T	Н (кгс)	Черт. 2,3
Средняя нормальная нагрузка цикла	P_m	Н (кгс)	Черт. 4
Амплитуда нормальной нагрузки цикла	P_a	Н (кгс)	Черт. 4
Коэффициент, учитывающий соотношение между нормальной и касательной нагрузками на контакте	$K=\frac{T}{P}$	—	Черт. 3
Относительная величина проскальзывания между образцом и контртелом	λ_{c_3}	—	Черт. 1—2
Максимальное нормальное напряжение (давление) в центре зоны контакта	$\sigma_{z\max}$	МПа (кгс/мм^2)	Разд. 1

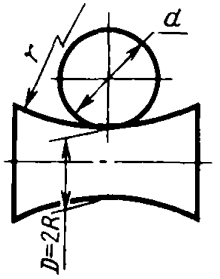
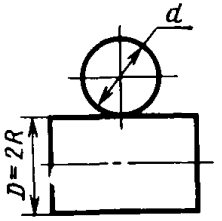
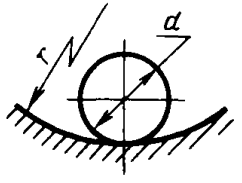
Продолжение

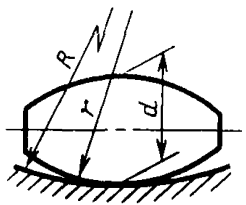
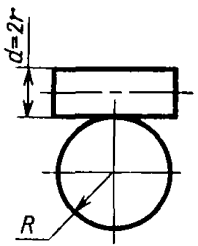
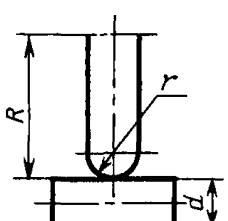
Наименование величины	Обозначение	Единица величины	Примечание
Нормальные напряжения в зоне контакта	σ_x; σ_y; σ_z	МПа (кгс/мм²)	Разд. 1
Главные напряжения в зоне контакта	σ_1; σ_2; σ_3	МПа (кгс/мм²)	Разд. 1
Эквивалентное напряжение — нормальное растягивающее напряжение, создающее в материале напряженное состояние, равнозначное сложному по характеристикам контактной усталости	$\sigma_{экв}$	МПа (кгс/мм²)	Разд. 1
Амплитуда напряжений цикла	σ_a	МПа (кгс/мм²)	$\sigma_a=\sigma_{z\max}$ — п. 1.1, черт. 1—2; $\sigma_a=(\sigma_{экв})_{\max}$ — п. 1.1.3, черт.3; $\sigma_a=(\sigma_{z\max})_a$ — п. 1.1, черт. 4
Среднее напряжение цикла	σ_m	МПа (кгс/мм²)	$\sigma_m=0$ — п. 1.1, черт. 1—3; $\sigma_m=(\sigma_{z\max})_m$ — п. 1.1, черт. 4
Наибольшее напряжение цикла	$\sigma_{наиб}$	МПа (кгс/мм²)	$\sigma_{наиб}=\sigma_{z\max}$ — п. 1.1, черт. 1—2; $\sigma_{наиб}=(\sigma_{экв})_{\max}$ — п. 1.1, черт. 3; $\sigma_{наиб}=\sigma_m+\sigma_a$ — п. 1.1, черт. 4
Наименьшее напряжение цикла	$\sigma_{наим}$	МПа (кгс/мм²)	$\sigma_{наим}=0$ — п. 1.1; $\sigma_{наим}=\sigma_m-\sigma_a$ — п. 1.1, черт. 4
Коэффициент асимметрии	R_σ	—	$R_\sigma=0$ — п. 1.1, черт. 1—3; $R_\sigma=\frac{\sigma_{наим}}{\sigma_{наиб}}$ — п. 1.1, черт. 4
Абсцисса точки перегиба кривой контактной усталости	N_0	Цикл	Черт. 9
Предел контактной выносливости	σ_R	МПа (кгс/мм²)	$(\sigma_{z\max})_0$ — п. 1.1, черт. 1—2 $(\sigma_{экв})_0$ — п. 1.1, черт. 3 $(\sigma_{z\max})_R$ — п. 1.1, черт. 4

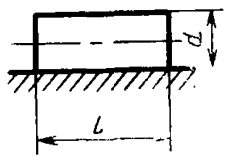
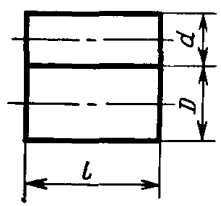
ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Рекомендуемое

Формулы для вычисления полуосей площадки контакта и максимального нормального напряжения

Основные геометрические поверхности, образующие рабочую часть образца и контртела	Чертеж	Расчетные формулы		Ω
		$E_1=E_2=2{,}15\cdot10^4$ кгс/мм² P, кгс	$E_1=E_2=21{,}08\cdot10^4$ МПа P, Н	
Шар с шаром		$a=0{,}04\left(\frac{PRr}{R+r}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=299{,}94P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R+r}{Rr}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a=0{,}009\left(\frac{PRr}{P+r}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=1374{,}19P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R+r}{Rr}\right)^{\frac{2}{3}}$	0
Шар с плоской плитой		$a=0{,}032(Pd)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=472{,}74\frac{P^{\frac{1}{3}}}{d^{\frac{2}{3}}}$	$a=0{,}007(Pd)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=2165{,}88\frac{P^{\frac{1}{3}}}{d^{\frac{2}{3}}}$	0
Шар с охватывающей сферой		$a=0{,}086\left(\frac{P}{\frac{2}{d}-\frac{1}{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=65{,}17P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{d}-\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a=0{,}019\left(\frac{P}{\frac{2}{d}-\frac{1}{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=298{,}56P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{d}-\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{3}}$	0

Основные геометрические поверхности, образующие рабочую часть образца и контртела	Чертеж	Расчетные формулы		2
		$E_1=E_2=2{,}15\cdot10^4$ кгс/мм² P, кгс	$E_1=E_2=21{,}08\cdot10^4$ МПа P, Н	
Шар с тороидальной поверхностью (знак — „минус" применяется в случае охватывающей поверхности радиусом R)		$a(b)=0{,}05n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{4}{d}\pm\frac{1}{R}-\frac{1}{r}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=188{,}48n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}\pm\frac{1}{R}-\frac{1}{r}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a(b)=$ $=0{,}011n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{4}{d}\pm\frac{1}{R}-\frac{1}{r}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=863{,}54n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}\pm\frac{1}{R}-\frac{1}{r}\right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{\pm\frac{1}{R}+\frac{1}{r}}{\frac{4}{d}\pm\frac{1}{R}-\frac{1}{r}}$
Шар с цилиндром		$a(b)=0{,}05n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{4}{d}+\frac{1}{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=188{,}48n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}+\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a(b)=0{,}011n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{4}{d}+\frac{1}{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=863{,}54n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}+\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{\frac{1}{R}}{\frac{4}{d}+\frac{1}{R}}$
Шар с прямолинейным желобом		$a(b)=0{,}05n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{4}{d}-\frac{1}{r}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=188{,}48n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}-\frac{1}{r}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a(b)=0{,}011n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{4}{d}-\frac{1}{r}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=863{,}54n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}-\frac{1}{r}\right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{\frac{1}{r}}{\frac{4}{d}-\frac{1}{r}}$

Основные геометрические поверхности, образующие рабочую часть образца и контртела	Чертеж	Расчетные формулы		Q
		$E_1=E_2=2{,}15\cdot10^4$ кгс/мм², P, кгс	$E_1=E_2=21{,}08\cdot10^4$ МПа, P, Н	
Бочкообразное тело с охватывающей сферой (при контакте с выпуклой сферой знак при $\frac{l}{R}$ меняется на плюс)		$a(b)=0{,}05n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{2}{d}+\frac{1}{r}-\frac{2}{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=188{,}48n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{d}+\frac{1}{r}-\frac{2}{R}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a(b)=0{,}011n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{2}{d}+\frac{1}{r}-\frac{2}{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=863{,}54n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{d}+\frac{1}{r}-\frac{2}{R}\right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{\frac{2}{d}-\frac{1}{r}}{\frac{2}{d}+\frac{1}{r}-\frac{2}{R}}$
Цилиндр с цилиндром со взаимно перпендикулярными осями		$a(b)=0{,}05n_{a(b)}\left(\frac{PRr}{P+r}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=188{,}48n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R+r}{Rr}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a(b)=0{,}011n_{a(b)}\left(\frac{PRr}{R+r}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=863{,}54n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{R+r}{Rr}\right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{R-r}{R+r}$
Цилиндр с тороидом		$a(b)=0{,}05n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{2}{d}+\frac{1}{R}+\frac{1}{r}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=188{,}48n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{d}+\frac{1}{R}+\frac{1}{r}\right)^{\frac{2}{3}}$	$a(b)=0{,}011n_{a(b)}\left(\frac{P}{\frac{2}{d}+\frac{1}{R}+\frac{1}{r}}\right)^{\frac{1}{3}}$ $\sigma_{z\max}=863{,}54n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{d}+\frac{1}{R}+\frac{1}{r}\right)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{\frac{2}{d}+\frac{1}{R}-\frac{1}{r}}{\frac{2}{d}+\frac{1}{R}+\frac{1}{r}}$

Основные геометрические поверхности, образующие рабочую часть образца и контртела	Чертеж	Расчетные формулы		Ω
		$E_1=E_2=2{,}15\cdot10^4$ кгс/мм² P, кгс	$E_1=E_2=21{,}08\cdot10^4$ МПа P, Н	
Цилиндр с плоскостью		$b=0{,}007\left(\frac{Pd}{l}\right)^{\frac{1}{2}}$ $\sigma_{z\max}=87{,}21\left(\frac{P}{dl}\right)^{\frac{1}{2}}$	$b=0{,}001\left(\frac{Pd}{l}\right)^{\frac{1}{2}}$ $\sigma_{z\max}=855{,}22\left(\frac{P}{dl}\right)^{\frac{1}{2}}$	
Цилиндр с выпуклой (+) и охватывающей (—) цилиндрическими поверхностями		$b=0{,}01\left(\frac{P}{\frac{2l}{d}\pm\frac{2l}{D}}\right)^{\frac{1}{2}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=63{,}66\left[\frac{P}{l}\left(\frac{2}{d}\pm\frac{2}{D}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$	$b=0{,}001\left(\frac{P}{\frac{2l}{d}\pm\frac{2l}{D}}\right)^{\frac{1}{2}}$ $\sigma_{z\max}=$ $=624{,}31\left[\frac{P}{l}\left(\frac{2}{d}\pm\frac{2}{D}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$	

Примечание. Значения коэффициентов $n_{a(b)}$; n_σ необходимо брать по табл. 3 справочного приложения 3 в соответствии со значением Ω $n_{a(b)}=n_a$ — для a; $n_{a(b)}=n_b$ — для b.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Справочное

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1

Соотношение коэффициента вариации V и R

V	R	V	R
0,10	0,01005	0,49	0,23399
0,11	0,01217	0,50	0,24529
0,12	0,01450	0,51	0,25694
0,13	0,01704	0,52	0,26892
0,14	0,01979	0,53	0,28125
0,16	0,02593	0,54	0,29893
0,17	0,02932	0,56	0,30696
0,18	0,03292	0,57	0,32035
0,19	0,03675	0,58	0,33412
0,20	0,04080	0,59	0,34825
0,21	0,04507	0,61	0,36277
0,22	0,04957	0,62	0,37768
0,23	0,05429	0,63	0,39298
0,24	0,05926	0,65	0,40869
0,25	0,06445	0,67	0,44133
0,26	0,06988	0,68	0,45828
0,27	0,07556	0,70	0,47566
0,28	0,08147	0,71	0,49849
0,29	0,08764	0,73	0,51175
0,31	0,09405	0,74	0,53047
0,32	0,10072	0,75	0,54966
0,33	0,10764	0,77	0,56931
0,34	0,11483	0,78	0,58944
0,35	0,12228	0,79	0,61005
0,36	0,13000	0,81	0,63116
0,37	0,13799	0,82	0,65277
0,38	0,14627	0,84	0,67489
0,39	0,15483	0,85	0,69753
0,40	0,16367	0,87	0,72070
0,42	0,17280	0,88	0,74410
0,43	0,18223	0,90	0,76367
0,44	0,19196	0,92	0,79348
0,45	0,20199	0,93	0,81885
0,46	0,21234	0,95	0,84480
0,47	0,22300	0,96	0,87133

Таблица 2

Значения Q в зависимости от β и δ

δ	Значение Q при β, равном	
	0,90	0,95
0,01	16420,0	27060,0
0,02	4110,0	6760,0
0,03	1825,0	3010,0
0,04	1030,0	1690,0
0,05	657,0	1080,0
0,06	456,0	752,0
0,07	335,0	552,0
0,08	257,0	464,0
0,09	203,0	334,4
0,10	164,0	271,0
0,11	136,0	224,0
0,12	114,0	188,0
0,13	97,2	160,0
0,14	83,8	138,0
0,15	73,0	120,0
0,16	64,2	106,0
0,17	56,8	93,6
0,18	50,7	83,5
0,19	45,5	74,9
0,20	41,1	67,6
0,21	37,2	61,3
0,22	33,9	55,9
0,23	31,0	51,1
0,24	28,5	47,0
0,25	26,3	43,3
0,26	24,3	40,0
0,27	22,5	37,1
0,28	20,9	34,5
0,29	19,5	32,2
0,30	18,2	30,1
0,31	17,1	28,2
0,32	16,0	26,4
0,33	15,1	24,8

Таблица 3

Значения коэффициентов n_a, n_b, $n_э$

e_a	Ω	n_a	n_b	$n_э$
0,050	0,01923	1,013	0,9873	0,9999
0,100	0,03949	1,027	0,9742	0,9997
0,150	0,06087	1,042	0,9606	0,9992
0,200	0,08350	1,058	0,9465	0,9985
0,250	0,1075	1,076	0,9318	0,9974

Продолжение табл. 3

e^2	Ω	n_a	n_b	n_σ
0,300	0,1330	1,095	0,9165	0,9960
0,350	0,1602	1,117	0,9005	0,9942
0,400	0,1894	1,141	0,8837	0,9919
0,450	0,2207	1,168	0,8660	0,9890
0,500	0,2545	1,198	0,8472	0,9853
0,550	0,2913	1,233	0,8271	0,9805
0,600	0,3314	1,274	0,8056	0,9746
0,650	0,3755	1,322	0,7822	0,9669
0,700	0,4245	1,381	0,7565	0,9571
0,750	0,4795	1,456	0,7278	0,9440
0,760	0,4914	1,473	0,7216	0,9409
0,770	0,5036	1,491	0,7152	0,9376
0,780	0,5161	1,511	0,7086	0,9340
0,790	0,5291	1,532	0,7019	0,9302
0,800	0,5423	1,554	0,6949	0,9262
0,810	0,5560	1,578	0,6876	0,9219
0,820	0,5702	1,603	0,6801	0,9172
0,830	0,5848	1,631	0,6723	0,9121
0,840	0,5999	1,660	0,6642	0,9067
0,850	0,6155	1,693	0,6557	0,9008
0,860	0,6317	1,729	0,6468	0,8944
0,870	0,6486	1,768	0,6374	0,8873
0,880	0,6662	1,812	0,6276	0,8766
0,890	0,6845	1,861	0,6171	0,8710
0,900	0,7037	1,916	0,6059	0,8614
0,910	0,7238	1,979	0,5938	0,8507
0,920	0,7449	2,053	0,5808	0,8386
0,930	0,7673	2,141	0,5665	0,8246
0,940	0,7911	2,248	0,5505	0,8082
0,950	0,8166	2,381	0,5325	0,7887
0,955	0,8300	2,463	0,5224	0,7774
0,960	0,8441	2,557	0,5114	0,7647
0,965	0,8587	2,669	0,4993	0,7504
0,970	0,8741	2,805	0,4858	0,7338
0,975	0,8904	2,975	0,4704	0,7144
0,980	0,9077	3,199	0,4524	0,6909
0,981	0,9113	3,253	0,4484	0,6856
0,982	0,9150	3,311	0,4442	0,6799
0,983	0,9187	3,373	0,4398	0,6740
0,984	0,9225	3,441	0,4352	0,6678
0,985	0,9264	3,514	0,4304	0,6612
0,986	0,9303	3,594	0,4253	0,6542
0,987	0,9342	3,683	0,4199	0,6467

Продолжение табл. 3

e^2	Ω	n_a	n_b	n_σ
0,988	0,9383	3,781	0,4142	0,6387
0,989	0,9425	3,890	0,4080	0,6300
0,990	0,9467	4,014	0,4014	0,6206
0,991	0,9511	4,156	0,3942	0,6104
0,992	0,9556	4,320	0,3864	0,5990
0,993	0,9601	4,515	0,3777	0,5864
0,994	0,9649	4,750	0,3680	0,5721
0,995	0,9698	5,046	0,3568	0,5555
0,996	0,9749	5,432	0,3436	0,5358
0,997	0,9803	5,976	0,3273	0,5112
0,998	0,9861	6,837	0,3058	0,4783
0,999	0,9923	8,609	0,2722	0,4267

Примечание. $e=\sqrt{1+\beta^2}$ — относительный эксцентриситет контурного эллипса площадки контакта;

$$\beta=\frac{b}{a}.$$

Таблица 4

Полные эллиптические интегралы

e^2	$F(e)$	$E(e)$	e^2	$F(e)$	$E(e)$
0,00000	1,5708	1,57080	0,10244	1,6135	1,52976
0,00030	1,5709	1,57068	0,11326	1,6184	1,52533
0,00122	1,5713	1,57032	0,12456	1,6235	1,52068
0,00274	1,5719	1,56972	0,13631	1,6289	1,51581
0,00487	1,5727	1,56888	0,14851	1,6346	1,51074
0,00760	1,5737	1,56781	0,16113	1,6405	1,50547
0,01093	1,5751	1,56650	0,17417	1,6468	1,49999
0,01485	1,5767	1,56495	0,18761	1,6534	1,49431
0,01937	1,5785	1,56316	0,20142	1,6603	1,48843
0,02447	1,5805	1,56114	0,21560	1,6676	1,48236
0,03015	1,5828	1,55889	0,23012	1,6751	1,47610
0,03641	1,5854	1,55640	0,24498	1,6830	1,46965
0,04323	1,5882	1,55368	0,26014	1,6913	1,46302
0,05060	1,5913	1,55073	0,27560	1,6999	1,45622
0,05853	1,5946	1,54755	0,28606	1,7058	1,45158
0,06699	1,5981	1,54415	0,30196	1,7150	1,44449
0,07598	1,6020	1,54052	0,31810	1,7246	1,43722
0,07909	1,6033	1,53926	0,33447	1,7346	1,42980
0,08226	1,6047	1,53798	0,35103	1,7450	1,42222
0,09210	1,6090	1,53398	0,36778	1,7558	1,41448

Продолжение табл. 4

e^2	$F(e)$	$E(e)$	e^2	$F(e)$	$E(e)$
0,38469	1,7670	1,40660	0,93871	2,8106	1,07118
0,40174	1,7787	1,39857	0,94283	2,8439	1,06733
0,41891	1,7909	1,39040	0,94682	2,8786	1,06355
0,43618	1,8035	1,38211	0,95066	2,9148	1,05983
0,45353	1,8166	1,37368	0,95438	2,9525	1,05617
0,47093	1,8302	1,36514	0,95795	2,9919	1,05259
0,48837	1,8443	1,35648	0,96138	3,0331	1,04908
0,50582	1,8590	1,34771	0,96467	3,0764	1,04565
0,52326	1,8743	1,33884	0,96782	3,1218	1,04230
0,54068	1,8902	1,32987	0,96985	3,1534	1,04011
0,55226	1,9011	1,32384	0,97132	3,1778	1,03850
0,56959	1,9180	1,31473	0,97276	3,2029	1,03691
0,58682	1,9356	1,30554	0,97416	3,2287	1,03534
0,60396	1,9539	1,29628	0,97553	3,2553	1,03379
0,62096	1,9729	1,28695	0,97686	3,2826	1,03227
0,63782	1,9927	1,27757	0,97815	3,3108	1,03077
0,65451	2,0133	1,26815	0,97941	3,3399	1,02929
0,67101	2,0347	1,25868	0,98063	3,3699	1,02784
0,68730	2,0571	1,24918	0,98182	3,4008	1,02642
0,70337	2,0804	1,23966	0,98296	3,4329	1,02502
0,71919	2,1047	1,23013	0,98407	3,4661	1,02365
0,73473	2,1033	1,22059	0,98515	3,5004	1,02231
0,75000	2,1565	1,21106	0,98618	3,5361	1,02100
0,76496	2,1842	1,20154	0,98719	3,5731	1,01972
0,77960	2,2132	1,19205	0,98815	3,6117	1,01846
0,79389	2,2435	1,18259	0,98907	3,6519	1,01724
0,80783	2,2754	1,17318	0,98967	3,6796	1,01644
0,81239	2,2863	1,17006	0,99053	3,7228	1,01527
0,81916	2,3031	1,16538	0,99136	3,7680	1,01413
0,82583	2,3203	1,16073	0,99215	3,8154	1,01302
0,83240	2,3379	1,15609	0,99290	3,8653	1,01195
0,83887	2,3560	1,15147	0,99361	3,9178	1,01092
0,84523	2,3746	1,14687	0,99429	3,9734	1,00992
0,85149	2,3936	1,14230	0,99493	4,0323	1,00896
0,85764	2,4132	1,13775	0,99553	4,0950	1,00804
0,86369	2,4333	1,13323	0,99609	4,1620	1,00716
0,86962	2,4540	1,12874	0,99662	4,2338	1,00631
0,87544	2,4752	1,12428	0,99711	4,3114	1,00552
0,88115	2,4971	1,11985	0,99756	4,3956	1,00476
0,88674	2,5196	1,11545	0,99797	4,4876	1,00405
0,89221	2,5428	1,11109	0,99834	4,5890	1,00339
0,89756	2,5668	1,10677	0,99868	4,7020	1,00278
0,90279	2,5914	1,10248	0,99888	4,7852	1,00240
0,90621	2,6083	1,09965	0,99915	4,9247	1,00187
0,91124	2,6343	1,09543	0,99939	5,0869	1,00140
0,91614	2,6612	1,09127	0,99959	5,2809	1,00099
0,92091	2,6890	1,08715	0,99970	5,4349	1,00075
0,92556	2,7178	1,08307	0,99983	5,7224	1,00045
0,93007	2,7476	1,07905	0,99992	6,1278	1,00021
0,93446	2,7785	1,07509	1,0000	∞	1,00000

Таблица 5

Значение выборочной вероятности P_j для выборок малого объема

j ($j \leq n$)	Значение выборочной вероятности P_j для выборок малого объема при n, равном									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,5000	0,2929	0,2063	0,1591	0,1294	0,1091	0,0943	0,0830	0,0741	0,0670
2	—	0,7071	0,5000	0,3864	0,3147	0,2655	0,2295	0,2021	0,1806	0,1632
3	—	—	0,7937	0,6136	0,5000	0,4218	0,3648	0,3213	0,2871	0,2594
4	—	—	—	0,8409	0,6853	0,5782	0,5000	0,4404	0,3935	0,3557
5	—	—	—	—	0,8706	0,7345	0,6352	0,5596	0,5000	0,4519
6	—	—	—	—	—	0,8909	0,7705	0,6787	0,6065	0,5484
7	—	—	—	—	—	—	0,9057	0,7979	0,7129	0,6443
8	—	—	—	—	—	—	—	0,9170	0,8194	0,7406
9	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9259	0,8368
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9330

Продолжение табл. 5

l ($l<n$)	Значение выборочной вероятности P_l для выборок малого объема при n, равном									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,0611	0,0561	0,0519	0,0483	0,0452	0,0424	0,0400	0,0378	0,0358	0,0341
2	0,1489	0,1368	0,1266	0,1178	0,1101	0,1034	0,0975	0,0922	0,0874	0,0831
3	0,2366	0,2175	0,2013	0,1873	0,1751	0,1644	0,1550	0,1465	0,1390	0,1322
4	0,3244	0,2982	0,2760	0,2568	0,2401	0,2254	0,2125	0,2009	0,1905	0,1812
5	0,4122	0,3789	0,3506	0,3263	0,3051	0,2865	0,2700	0,2553	0,2421	0,2302
6	0,5000	0,4596	0,4253	0,3958	0,3700	0,3475	0,3275	0,3097	0,2937	0,2793
7	0,5878	0,5404	0,5000	0,4653	0,4350	0,4085	0,3850	0,3641	0,3453	0,3283
8	0,6756	0,6211	0,5747	0,5347	0,5000	0,4695	0,4425	0,4184	0,3968	0,3774
9	0,7634	0,7018	0,6494	0,6042	0,5650	0,5305	0,5000	0,4728	0,4484	0,4264
10	0,8511	0,7825	0,7240	0,6737	0,6300	0,5915	0,5575	0,5272	0,5000	0,4755
11	0,9389	0,8632	0,7987	0,7432	0,6949	0,6525	0,6150	0,5816	0,5516	0,5245
12	—	0,9439	0,8734	0,8125	0,7599	0,7135	0,6725	0,6359	0,6032	0,5736
13	—	—	0,9481	0,8822	0,8249	0,7746	0,7300	0,6903	0,6547	0,6226
14	—	—	—	0,9517	0,8899	0,8356	0,7875	0,7447	0,7063	0,6717
15	—	—	—	—	0,9548	0,8966	0,8450	0,7991	0,7579	0,7207
16	—	—	—	—	—	0,9576	0,9025	0,8535	0,8095	0,7698
17	—	—	—	—	—	—	0,9600	0,9078	0,8610	0,8188
18	—	—	—	—	—	—	—	0,9622	0,9126	0,8678
19	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9642	0,9169
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9659

Таблица 6

Квантили нормального распределения U_{P_l}

P_l	Квантили нормального распределения U_{P_l}									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,50	0,0000	0,00251	0,00501	0,00752	0,01002	0,01253	0,01504	0,01755	0,02005	0,02256
0,51	0,02507	0,02758	0,03008	0,03259	0,03510	0,03761	0,04012	0,04263	0,04513	0,04764
0,52	0,05015	0,05266	0,05517	0,05768	0,06020	0,06271	0,06522	0,06773	0,07024	0,07276
0,53	0,07527	0,07778	0,08030	0,08281	0,08533	0,8784	0,09036	0,09288	0,09540	0,09791
0,54	0,1004	0,1030	0,1055	0,1080	0,1105	0,1130	0,1156	0,1181	0,1206	0,1231
0,55	0,1257	0,1282	0,1307	0,1332	0,1358	0,1383	0,1408	0,1434	0,1459	0,1484
0,56	0,1510	0,1535	0,1560	0,1586	0,1611	0,1637	0,1662	0,1687	0,1713	0,1738
0,57	0,1764	0,1789	0,1815	0,1840	0,1866	0,1891	0,1917	0,1942	0,1968	0,1993
0,58	0,2019	0,2045	0,2070	0,2096	0,2121	0,2147	0,2173	0,2198	0,2224	0,2250
0,59	0,2275	0,2301	0,2327	0,2353	0,2378	0,2404	0,2430	0,2456	0,2482	0,2508
0,60	0,2533	0,2559	0,2585	0,2611	0,2637	0,2663	0,2689	0,2715	0,2741	0,2767
0,61	0,2793	0,2819	0,2845	0,2871	0,2898	0,2924	0,2950	0,2976	0,3002	0,3029
0,62	0,3055	0,3081	0,3107	0,3134	0,3160	0,3186	0,3213	0,3239	0,3266	0,3292
0,63	0,3319	0,3345	0,3372	0,3398	0,3425	0,3451	0,3478	0,3505	0,3531	0,3558
0,64	0,3585	0,3611	0,3638	0,3665	0,3692	0,3719	0,3745	0,3772	0,3799	0,3826

Продолжение табл. 6

P_l	Квантили нормального распределения U_{P_l}									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,65	0,3853	0,3880	0,3907	0,3934	0,3961	0,3989	0,4016	0,4043	0,4070	0,4097
0,66	0,4125	0,4152	0,4179	0,4207	0,4234	0,4261	0,4289	0,4316	0,4344	0,4372
0,67	0,4399	0,4427	0,4454	0,4482	0,4510	0,4538	0,4565	0,4593	0,4621	0,4649
0,68	0,4677	0,4705	0,4733	0,4761	0,4789	0,4817	0,4845	0,4874	0,4902	0,4930
0,69	0,4969	0,4987	0,5015	0,5044	0,5072	0,5101	0,5129	0,5158	0,5187	0,5215
0,70	0,5244	0,5273	0,5302	0,5330	0,5359	0,5388	0,5417	0,5446	0,5476	0,5505
0,71	0,5634	0,5563	0,5592	0,5622	0,5651	0,5681	0,5710	0,5740	0,5769	0,5799
0,72	0,5828	0,5858	0,5888	0,5918	0,5948	0,5978	0,6008	0,6038	0,6068	0,6098
0,73	0,6128	0,6158	0,6189	0,6219	0,6250	0,6280	0,6311	0,6341	0,6372	0,6403
0,74	0,6433	0,6464	0,6495	0,6526	0,6557	0,6588	0,6620	0,6651	0,6682	0,6713
0,75	0,6745	0,6776	0,6808	0,6840	0,6871	0,6903	0,6935	0,6967	0,6999	0,7031
0,76	0,7063	0,7095	0,7128	0,7160	0,7192	0,7225	0,7257	0,7290	0,7323	0,7356
0,77	0,7388	0,7421	0,7454	0,7488	0,7521	0,7554	0,7588	0,7621	0,7655	0,7688
0,78	0,7722	0,7756	0,7790	0,7824	0,7858	0,7892	0,7926	0,7961	0,7995	0,8030
0,79	0,8064	0,8099	0,8134	0,8169	0,8204	0,8239	0,8274	0,8310	0,8345	0,8381

Продолжение табл. 6

P_l	Квантили нормального распределения U_{P_l}									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,80	0,8416	0,8452	0,8488	0,8524	0,8560	0,8596	0,8633	0,8669	0,8705	0,8742
0,81	0,8779	0,8816	0,8853	0,8890	0,8927	0,8965	0,9002	0,9040	0,9078	0,9116
0,82	0,9154	0,9192	0,9230	0,9269	0,9307	0,9346	0,9385	0,9424	0,9463	0,9502
0,83	0,9542	0,9581	0,9621	0,9661	0,9701	0,9741	0,9782	0,9822	0,9863	0,9904
0,84	0,994	0,999	1,003	1,007	1,011	1,015	0,019	1,024	1,028	1,032
0,85	1,036	1,041	1,045	1,049	1,054	1,058	1,063	1,067	1,071	1,076
0,86	1,080	1,085	1,089	1,094	1,098	1,103	1,108	1,112	1,117	1,122
0,87	1,126	1,131	1,136	1,141	1,146	1,150	1,155	1,160	1,165	1,170
0,88	1,175	1,180	1,185	1,190	1,195	1,200	1,206	1,211	1,216	1,221
0,89	1,227	1,232	1,237	1,243	1,248	1,254	1,259	1,265	1,270	1,276
0,90	1,282	1,287	1,293	1,299	1,305	1,311	1,317	1,323	1,329	1,335
0,91	1,341	1,347	1,353	1,359	1,366	1,372	1,379	1,385	1,392	1,398
0,92	1,405	1,412	1,419	1,426	1,433	1,440	1,447	1,454	1,461	1,468
0,93	1,476	1,483	1,491	1,499	1,506	1,514	1,522	1,530	1,538	1,546
0,94	1,555	1,563	1,572	1,580	1,589	1,598	1,607	1,612	1,626	1,635

Продолжение табл. 6

P_j	Квантили нормального распределения U_{P_j}									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,95	1,645	1,655	1,665	1,675	1,685	1,695	1,706	1,717	1,728	1,739
0,96	1,751	1,762	1,774	1,787	1,799	1,812	1,825	1,838	1,852	1,866
0,97	1,881	1,896	1,911	1,927	1,943	1,960	1,977	1,995	2,014	2,034
0,98	2,054	2,075	2,097	2,120	2,144	2,170	2,197	2,226	2,257	2,290
0,99	2,326	2,366	2,409	2,457	2,512	2,576	2,652	2,748	2,878	3,090
0,991	2,366	2,370	2,374	2,378	2,382	2,387	2,391	2,395	2,400	2,404
0,992	2,409	2,414	2,418	2,423	2,428	2,432	2,437	2,442	2,447	2,452
0,993	2,457	2,462	2,468	2,473	2,478	2,484	2,489	2,495	2,501	2,506
0,994	2,512	2,518	2,524	2,530	2,536	2,543	2,549	2,556	2,562	2,569
0,995	2,576	2,583	2,590	2,597	2,605	2,612	2,620	2,628	2,636	2,644
0,996	2,652	2,661	2,669	2,678	2,687	2,697	2,708	2,716	2,727	2,737
0,997	2,748	2,759	2,770	2,782	2,794	2,807	2,820	2,834	2,848	2,863
0,998	2,878	2,894	2,911	2,929	2,948	2,968	2,989	3,011	3,036	3,062
0,999	3,090	3,121	3,156	3,195	3,239	3,291	3,353	3,432	3,540	3,719

Примечание. В таблице приведены значения квантилей U_{P_j} для $P_j > 0{,}50$. При $P_j < 0{,}50$ следует пользоваться выражением $U(-p) = U(1-p)$. Например, для $P_j = 0{,}20$ находим $U_{0,20} = U_{(1-0,80)} = U_{(0,80)} = -0{,}8416$.

Таблица 7

Значения $t_{\beta K}$ в зависимости от доверительной вероятности β и числа степеней свободы K

K	Значения $t_{\beta K}$ при β, равном			
	0,90	0,95	0,98	0,99
1	6,314	12,706	31,821	63,657
2	2,920	4,303	6,965	9,925
3	2,353	3,182	4,541	5,841
4	2,132	2,776	3,747	4,604
5	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,812	2,228	2,764	3,169
12	1,782	2,179	2,681	3,055
14	1,761	2,145	2,624	2,977
16	1,746	2,120	2,583	2,921
18	1,734	2,101	2,552	2,878
20	1,725	2,086	2,528	2,845
22	1,717	2,074	2,508	2,819
24	1,711	2,064	2,492	2,797
26	1,706	2,056	2,479	2,779
28	1,701	2,048	2,467	2,763
30	1,697	2,042	2,457	2,750
∞	1,645	1,960	2,326	2,576

Таблица 8

Значения ψ_1 и ψ_2 в зависимости от доверительной вероятности β и числа степеней свободы K

K	β=0,99		β=0,98		β=0,95		β=0,90	
	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2	ψ_1	ψ_2
1	0,356	159,000	0,388	79,800	0,446	31,900	0,510	15,900
2	0,434	14,100	0,466	9,970	0,521	6,280	0,578	4,400
3	0,483	6,470	0,514	5,110	0,566	3,730	0,620	2,920
4	0,519	4,390	0,549	3,670	0,599	2,870	0,649	2,370
5	0,546	3,480	0,576	3,000	0,624	2,450	0,672	2,090
6	0,569	2,980	0,597	2,620	0,644	2,202	0,690	1,916
7	0,588	2,660	0,616	2,376	0,661	2,035	0,705	1,797
8	0,604	2,440	0,631	2,205	0,675	1,916	0,718	1,711
9	0,618	2,277	0,644	2,076	0,688	1,826	0,729	1,645
10	0,630	2,154	0,656	1,977	0,699	1,755	0,739	1,593
11	0,641	2,056	0,667	1,898	0,708	1,698	0,748	1,550
12	0,651	1,976	0,677	1,833	0,717	1,651	0,755	1,515
13	0,660	1,910	0,685	1,779	0,725	1,611	0,762	1,485
14	0,669	1,854	0,693	1,733	0,732	1,577	0,769	1,460
15	0,676	1,806	0,700	1,694	0,739	1,548	0,775	1,437
16	0,683	1,764	0,707	1,659	0,745	1,522	0,780	1,418
17	0,690	1,727	0,713	1,629	0,750	1,499	0,785	1,400
18	0,696	1,695	0,719	1,602	0,756	1,479	0,790	1,385
19	0,702	1,666	0,725	1,578	0,760	1,460	0,794	1,370
20	0,707	1,640	0,730	1,556	0,765	1,444	0,798	1,358
21	0,712	1,617	0,734	1,536	0,769	1,429	0,802	1,346
22	0,717	1,595	0,739	1,519	0,773	1,416	0,805	1,335
23	0,722	1,576	0,743	1,502	0,777	1,402	0,809	1,326
24	0,726	1,558	0,747	1,487	0,781	1,391	0,812	1,316
25	0,730	1,541	0,751	1,473	0,784	1,380	0,815	1,308
26	0,734	1,526	0,755	1,460	0,788	1,371	0,818	1,300
27	0,737	1,512	0,758	1,448	0,791	1,361	0,820	1,293
28	0,741	1,499	0,762	1,436	0,794	1,352	0,823	1,286
29	0,744	1,487	0,765	1,426	0,796	1,344	0,825	1,279
30	0,748	1,475	0,768	1,417	0,799	1,337	0,828	1,274
40	0,774	1,390	0,792	1,344	0,821	1,279	0,847	1,228
50	0,793	1,336	0,810	1,297	0,837	1,243	0,861	1,199
60	0,808	1,299	0,824	1,265	0,849	1,217	0,871	1,179
70	0,820	1,272	0,835	1,241	0,858	1,198	0,879	1,163
80	0,829	1,250	0,844	1,222	0,866	1,183	0,886	1,151
90	0,838	1,233	0,852	1,207	0,873	1,171	0,892	1,141
100	0,845	1,219	0,858	1,195	0,878	1,161	0,897	1,133
120	0,887	1,150	0,897	1,130	0,912	1,110	0,925	1,106

Таблица 9

Значения F-критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости

K_2	Значения F при K_1, равном								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
28	4,2	3,3	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

Таблица 19

Значения F-критерия Фишера при 1%-ном уровне значимости

K_2	Значения F при K_1, равном								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
1	4052,0	4999,0	5625,0	5764,0	5889,0	5928,0	6106,0	6234,0	6366,0
2	98,5	99,0	99,2	99,3	99,3	99,4	99,5	99,5	99,5
3	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,1	26,6	26,1
4	21,2	18,0	16,6	16,0	15,5	15,2	14,4	13,9	13,5
5	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	9,9	9,5	9,0
6	13,7	10,9	9,8	9,2	8,8	8,5	7,7	7,3	6,9
7	12,3	9,6	8,5	7,9	7,5	7,2	6,5	6,1	5,7
8	11,3	8,7	7,6	7,1	6,6	6,4	5,7	5,3	4,9
9	10,6	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,1	4,7	4,3
10	10,0	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	4,7	4,3	3,9
11	9,9	7,2	6,2	5,9	5,3	5,1	4,4	4,0	3,6
12	9,3	6,9	6,0	5,4	5,1	4,8	4,2	3,8	3,4
13	9,1	6,7	5,7	5,2	4,9	4,6	4,0	3,6	3,2
14	8,9	6,5	5,6	5,1	4,7	4,5	3,8	3,4	3,0
15	8,7	6,4	5,4	4,9	4,6	4,3	3,7	3,3	2,9
16	8,5	6,3	5,3	4,8	4,4	4,2	3,6	3,2	2,8
17	8,4	6,1	5,2	4,7	4,3	4,1	3,5	3,1	2,7
18	8,2	6,0	5,1	4,6	4,3	4,0	3,4	3,0	2,6
20	8,1	5,9	4,9	4,4	4,1	3,9	3,2	2,9	2,4
22	7,9	5,7	4,8	4,3	4,0	3,8	3,1	2,8	2,3
24	7,8	5,6	4,7	4,2	3,9	3,7	3,0	2,7	2,2
26	7,7	5,5	4,6	4,1	3,8	3,6	3,0	2,6	2,1
28	7,6	5,5	4,6	4,1	3,8	3,5	2,9	2,5	2,1
30	7,6	5,4	4,5	4,0	3,7	3,5	2,8	2,5	2,0
40	7,3	5,2	4,3	3,8	3,5	3,3	2,7	2,3	1,8
60	7,1	5,0	4,1	3,7	3,3	3,1	2,5	2,1	1,6
120	6,8	4,8	3,9	3,5	3,2	3,0	2,3	1,9	1,4
∞	6,6	4,6	3,8	3,3	3,0	2,8	2,2	1,8	1,1

Таблица 11

Значения критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости

K_2	Значения критерия Кохрена при K_1, равном													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	36	144	∞
2	0,999	0,973	0,939	0,906	0,877	0,853	0,833	0,916	0,801	0,788	0,734	0,660	0,581	0,500
3	0,967	0,871	0,798	0,746	0,707	0,677	0,653	0,633	0,617	0,603	0,547	0,475	0,403	0,333
4	0,907	0,768	0,684	0,629	0,590	0,560	0,537	0,518	0,502	0,488	0,437	0,372	0,309	0,250
5	0,841	0,684	0,598	0,544	0,507	0,478	0,456	0,439	0,424	0,412	0,365	0,307	0,251	0,200
6	0,781	0,616	0,532	0,480	0,445	0,418	0,398	0,382	0,368	0,357	0,314	0,261	0,212	0,167
7	0,727	0,561	0,480	0,431	0,397	0,373	0,354	0,338	0,326	0,315	0,276	0,228	0,183	0,143
8	0,680	0,516	0,438	0,391	0,360	0,336	0,319	0,304	0,293	0,283	0,246	0,202	0,162	0,125
9	0,639	0,478	0,403	0,358	0,329	0,307	0,290	0,277	0,266	0,257	0,223	0,182	0,145	0,111
10	0,602	0,445	0,373	0,331	0,303	0,282	0,267	0,254	0,244	0,235	0,203	0,166	0,131	0,100
12	0,541	0,392	0,326	0,288	0,262	0,244	0,230	0,219	0,210	0,202	0,174	0,140	0,110	0,833
15	0,471	0,335	0,276	0,242	0,220	0,203	0,191	0,182	0,174	0,167	0,143	0,114	0,089	0,067
20	0,389	0,271	0,221	0,192	0,174	0,160	0,150	0,142	0,136	0,130	0,111	0,088	0,068	0,050
24	0,343	0,255	0,191	0,166	0,149	0,137	0,129	0,122	0,116	0,111	0,094	0,074	0,057	0,042
30	0,293	0,198	0,159	0,138	0,124	0,114	0,106	0,100	0,096	0,092	0,077	0,060	0,046	0,033

Таблица 12

Значения критерия Кохрена при 1%-ном уровне значимости

K_2	Значения критерия Кохрена при K_1, равном													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	36	144	∞
2	0,999	0,995	0,979	0,959	0,937	0,917	0,899	0,882	0,867	0,854	0,795	0,707	0,606	0,500
3	0,993	0,942	0,883	0,834	0,793	0,761	0,734	0,711	0,691	0,674	0,606	0,515	0,423	0,333
4	0,968	0,864	0,781	0,721	0,676	0,641	0,613	0,590	0,570	0,554	0,488	0,406	0,325	0,250
5	0,928	0,789	0,696	0,633	0,588	0,553	0,526	0,504	0,485	0,470	0,409	0,335	0,264	0,200
6	0,883	0,722	0,626	0,564	0,520	0,487	0,461	0,440	0,423	0,408	0,353	0,286	0,223	0,167
7	0,838	0,664	0,569	0,508	0,466	0,435	0,411	0,391	0,375	0,362	0,311	0,249	0,193	0,143
8	0,795	0,615	0,520	0,463	0,423	0,393	0,370	0,352	0,337	0,325	0,278	0,221	0,170	0,125
9	0,754	0,573	0,481	0,425	0,387	0,359	0,338	0,320	0,307	0,295	0,251	0,199	0,152	0,111
10	0,718	0,536	0,447	0,393	0,357	0,331	0,311	0,295	0,281	0,270	0,230	0,181	0,138	0,100
12	0,653	0,475	0,392	0,333	0,310	0,286	0,268	0,254	0,242	0,232	0,196	0,154	0,116	0,083
15	0,575	0,407	0,332	0,288	0,259	0,239	0,223	0,210	0,200	0,192	0,161	0,125	0,093	0,067
20	0,480	0,330	0,265	0,229	0,205	0,188	0,175	0,165	0,157	0,150	0,125	0,096	0,071	0,050
24	0,425	0,287	0,230	0,197	0,176	0,161	0,150	0,140	0,134	0,128	0,106	0,081	0,060	0,042
30	0,363	0,241	0,191	0,164	0,145	0,133	0,123	0,116	0,110	0,105	0,077	0,066	0,048	0,033

Таблица 13

Значения $\chi^2_{\beta K}$ в зависимости от доверительной вероятности β и числа степеней свободы K

K	Значения $\chi^2_{\beta K}$ при β, равном			
	0,90	0,95	0,98	0,99
2	0,211	0,103	0,040	0,020
3	0,584	0,352	0,185	0,115
4	1,064	0,711	0,429	0,297
5	1,610	1,145	0,752	0,554
6	2,204	1,635	1,134	0,872
7	2,883	2,167	1,564	1,239
8	3,490	2,733	2,032	1,646
9	4,168	3,325	2,532	2,088
10	4,865	3,940	3,059	2,558
11	5,578	4,575	3,609	3,053
12	6,304	5,226	4,178	3,571
13	7,042	5,892	4,765	4,107
14	7,790	6,571	5,368	4,660
15	8,547	7,261	5,985	5,229
16	9,312	7,962	6,614	5,812
17	10,085	8,672	7,255	6,408
18	10,865	9,390	7,906	7,015
19	11,651	10,117	8,567	7,633
20	12,443	10,851	9,237	8,260
21	13,240	11,591	9,915	8,897
22	14,041	12,338	10,600	9,542
23	14,848	13,091	11,293	10,196
24	14,659	13,848	11,992	10,856
25	16,473	14,611	12,097	11,524
26	17,292	15,379	12,409	12,198
27	18,114	16,151	14,125	12,879
28	18,939	16,928	14,847	13,565
29	19,768	17,708	15,574	14,256
30	20,599	18,493	16,306	14,953

ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Рекомендуемое

ПРИМЕР РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ $\sigma_{z\max}$ С УЧЕТОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ

1. Цель испытаний — определение значений действительных контактных напряжений при воздействии факторов, наиболее ответственных за процесс пластического формоизменения рабочих поверхностей.

2. Требования к испытательному оборудованию — по разд. 2 настоящего стандарта.

Оборудование — испытательная машина типа МИД, моделирующая схему нагружения качения без проскальзывания.

3. Условия проведения испытаний соответствовали разд. 3 настоящего стандарта.

Частота нагружения — 500 Гц.

Число образцов — по три образца на каждом режиме нагружения.

Смазочный материал — масло «Индустриальное 20».

Способ подвода смазочного материала — фитильный.

4. Отбор образцов — по разд. 5 настоящего стандарта.

Образец — шар диаметром 12,66 мм.

Контртело — цилиндрический диск диаметром 150 мм.

Материал образцов и контртел — подшипниковая сталь марки ШХ-15.

Твердость образцов и контртел — HRC 57 и HRC 63.

Шероховатость поверхности рабочей части образца — $Ra \leqslant 0{,}32$ мкм по ГОСТ 2789—73.

5. Независимыми переменными являются следующие факторы: $\sigma_{z\max}$; N — число циклов нагружений шара, вращающегося между двумя контртелами; твердость шара и цилиндрического диска (контртела).

В качестве зависимых переменных (откликов) приняты максимальное $(\sigma_{z\max})_g$ и среднее $(P_{ср})_g$ напряжения в центре зоны контакта, которые определяют с учетом изменения геометрии рабочих поверхностей в зоне контакта. Уровни факторов и матрица планирования полного факторного эксперимента класса 2^3 приведена в табл. 1, 2.

Таблица 1

Независимые переменные	$\sigma_{z\max}$, МПа	$lg\ N$, цикл	Твердость шара и контртела HRC
Основной уровень	5000	4	60
Интервал изменения	1000	2	3
Верхний уровень	6000	6	63
Нижний уровень	4000	2	57

Перевод кодированных переменных в действительные значения факторов производят по формулам:

$$X_1 = \frac{\sigma_{z\max} - 5000}{1000}\ ; \qquad (1)$$

$$X_2=\frac{\lg N-4}{2}\ ; \qquad (2)$$

$$X_3=\frac{\text{Твердость(HRC)}-60\text{(HRC)}}{3}\ . \qquad (3)$$

Таблица 2

Номер режима	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	Зависимые переменные: $(\sigma_{z\max})_g$ в МПа (кгс/мм²)	Зависимые переменные: $(P_{ср})_g$ в МПа (кгс/мм²)
1	+	−	−	−	+	+	+	−	3322 (338,6)	2257 (230,1)
2	+	+	−	−	−	−	+	+	4267 (435,0)	3072 (313,1)
3	+	−	+	−	−	+	−	+	3037 (309,6)	2090 (213,0)
4	+	+	+	−	+	−	−	−	3720 (379,2)	2732 (278,5)
5	+	−	−	+	+	−	−	+	3365 (343,0)	2294 (233,8)
6	+	+	−	+	−	+	−	−	5214 (531,5)	3589 (365,9)
7	+	−	+	+	−	−	+	−	3241 (330,4)	2205 (224,8)
8	+	+	+	+	+	+	+	+	5147 (524,7)	3569 (363,8)

Примечание. X_0 — кодовое обозначение основного уровня зависимой переменной; X_1—X_3 — кодовые обозначения факторов.

6. На заданных режимах испытаний шарам задают наработки. После проведения эксперимента шар снимают с испытательной машины и дорожку качения покрывают тонким слоем сажевого покрытия. Далее этот же шар ставят в машину и на нагрузке, при которой проводят эксперимент на дорожке качения шара, получают 6—8 отпечатков пятна контакта шара с цилиндрическим диском. Измеряют на микроскопе ширину этих площадок ($2y$) в различных сечениях (X) и определяют средние значения координат контура пятна контакта.

Для всех режимов испытаний контур пятна отличается от эллиптического.

7. Значения зависимых переменных $(\sigma_{z\max})_g$ и $(P_{ср})_g$ оценивают следующим образом. Контур полученных в эксперименте пятен контакта аппроксимируют зависимостью

$$y^2=A+Bx^2+Cx^4+Dx^6+Kx^8. \qquad (4)$$

Для определения коэффициентов A, B, C, D и K решают систему пяти уравнений с использованием осредненных координат контура.

Площадь пятна контакта вычисляют по формуле

$$S=4\int_0^a \sqrt{A+Bx^2+Cx^4+Dx^6+Kx^8}\,dx. \qquad (5)$$

Исходя из полученной площади, действительное значение среднего контактного напряжения вычисляют по формуле

$$(P_{ср})_g=\frac{P}{S}\ . \qquad (6)$$

Контур площадки контакта (черт. 1 и 2) разбивают на ряд полос, параллельных оси y, и рассматривают их как участки линейного контакта цилиндра с цилиндром. Для данного вида контакта формула для вычисления полуоси имеет вид (см. п. 1.6.6 настоящего стандарта)

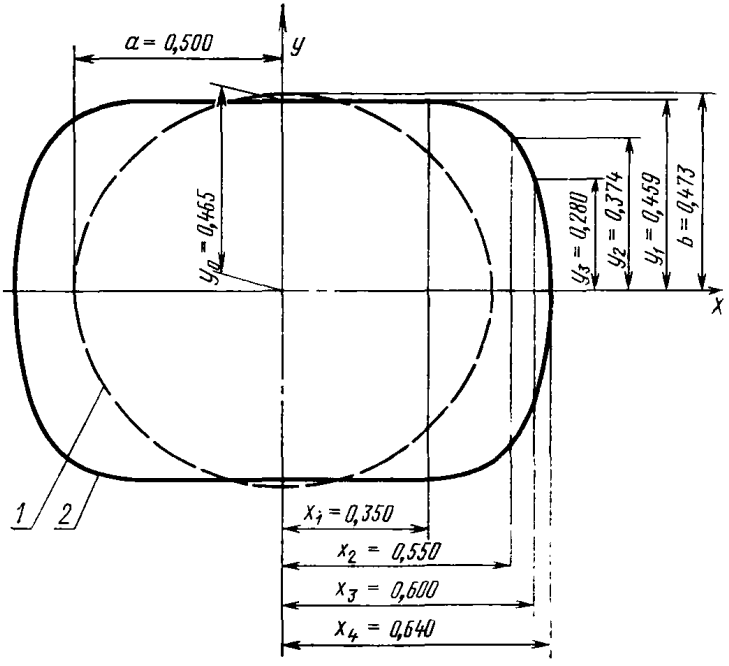
$$b=0{,}7979\left[\frac{g\eta Dd}{(D+d)}\right]^{1/2}\ , \qquad (7)$$

где

g — погонная нагрузка ($g=\frac{P}{l}$);

η — см. п. 1.6.4.

Профиль пятна контакта для четвертого режима



1—рассчитанный по формулам теории упругости; *2*—полученный экспериментально

Черт. 1

Из формулы (7) имеем

$$g_x=\frac{bx^3(D^2+d)}{0,7979^2\eta Dd}=cb_x^2. \qquad (8)$$

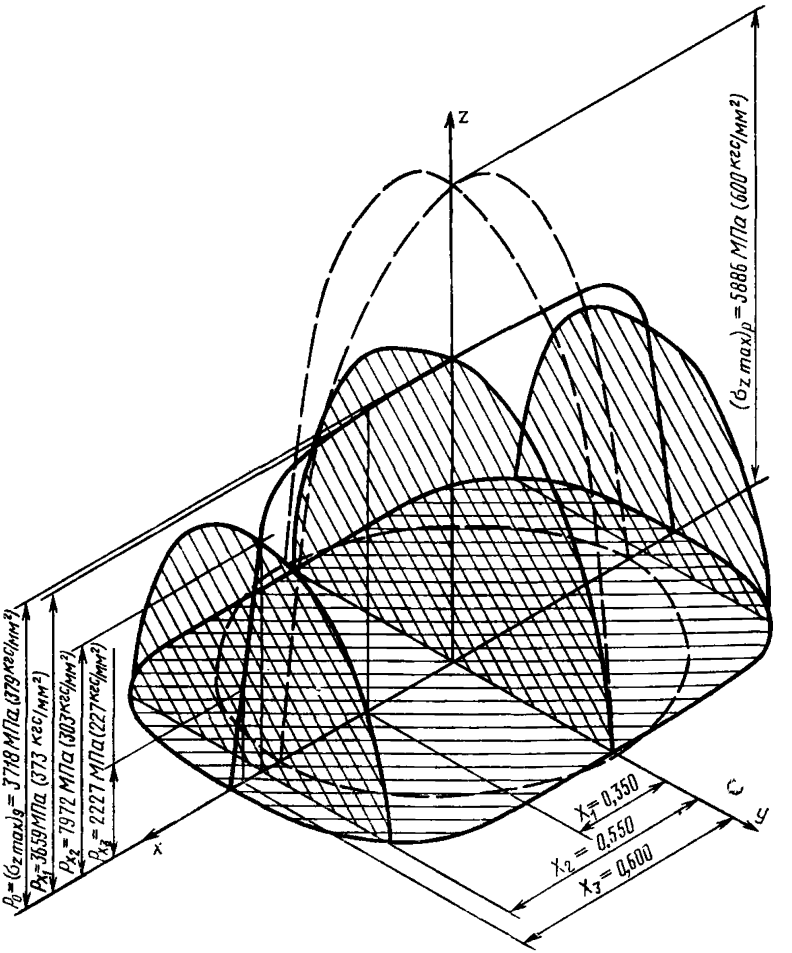
Общая нагрузка на контакте

$$P=2\int_0^a g_x dx=2c\int_0^a b_x^2 dx;\ c=\frac{P}{2\int_0^a b_x dx}.$$

Подставив c в формулу (8), получим

$$g_x=\frac{Pb_x^2}{2\int_0^a b_x^2 dx}. \qquad (9)$$

Распределение напряжений на площадке контакта для четвертого режима нагружения



Черт. 2

Полагаем эллиптический закон распределения напряжений по оси y (черт. 1), при этом справедливо соотношение

$$\frac{P_{xy}^2}{P_{x0}^2} + \frac{y^2}{b_x^2} = 1.$$

Общая нагрузка на полоске единичной ширины

$$g_x = 2\int_0^{bx} P_{xy}\,dy.$$

Половина площади эллипса с полуосями P_{x0} и b_x равна $\frac{\pi}{2} P_{x0} b_x$ соответственно

$$g_x = \frac{\pi}{2} P_{x0} b_x. \tag{10}$$

Приравнивая формулы (9) и (10), имеем

$$P_{x0} = \frac{P \cdot b_x}{\pi \int_0^a b_x^2 \, dx}$$

или

$$P_0 = (\sigma_{z\max})_g = \frac{P b_0}{\pi \int_0^a b_x^2 \, dx}. \tag{11}$$

Для эллиптической площадки контакта $\int_0^a b_x^2 dx = \frac{2}{3} ab^2$ и $\sigma_{z\max} = 1{,}5 \frac{P}{\pi ab}$ то есть получаем формулу Герца, что свидетельствует о достаточной точности расчета. Используя зависимость (4) и подставляя формулу (11), окончательно получаем

$$(\sigma_{z\max})_g = \frac{P b_0}{\pi \left(Aa + \beta \frac{a^3}{3} + C\frac{a^5}{5} + D\frac{a^7}{7} + K\frac{a^9}{9}\right)}. \tag{12}$$

Расчеты по аппроксимации контуров пятна контакта, вычислению площадей и распределению напряжений проведены на ЭЦВМ «Наири-2».

В качестве примера на черт. 1 и 2 приведено распределение напряжений и профиль пятна контакта для четвертого режима нагружения.

Из полученных значений $(P_{ср})_g$ и $(\sigma_{z\max})_g$ (см. табл. 2) следует, что для всех режимов испытаний $(\sigma_{z\max})_g < 1{,}5\ (P_{ср})_g$. С первого по восьмой режим отличия от точечного контакта, выражающиеся величиной $(\sigma_{z\max})_g / (P_{ср})_g$, соответственно составляют 1,47; 1,39; 1,45; 1,36; 1,47; 1,45; 1,47; 1,44.

8. Обработку результатов эксперимента, производят следующим образом.

Перед расчетом коэффициентов регрессии полиномиальной модели проводят проверку однородности дисперсий параллельных опытов. Однородность дисперсий проверяют по критерию Кохрена (см. рекомендуемое приложение 15). Поминомиальная модель, описывающая влияние факторов их взаимодействий на отклик $(\sigma_{z\max})_g$ имеет вид

$$(\sigma_{z\max})_g = 9{,}81(398{,}982 + 68{,}613X_1 - 13{,}034X_2 + 33{,}383X_3 - 2{,}587X_1X_2 + 27{,}097X_1X_3 + 8{,}180X_2X_3 + 4{,}082X_1X_2X_3). \tag{13}$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии осуществлена построением доверительного интервала.

Незначимы оказались три коэффициента регрессии (β_{12}; β_{23}; β_{123}).

Окончательно полиномиальная модель запишется в виде

$$(\sigma_{z\max})_g = 9{,}81(398{,}932 + 68{,}613X_1 - 13{,}034X_2 + 33{,}383X_3 - 27{,}097X_1X_3). \tag{14}$$

Из полученной модели видно, что на процесс формоизменения рабочих поверхностей существенно влияют все факторы, а также одно взаимодействие. В порядке убывания значимости факторы располагаются в следующей последовательности: уровень нагружения, твердость материала, число циклов нагружения.

9. Измерение профиля дорожек качения производят следующим образом.

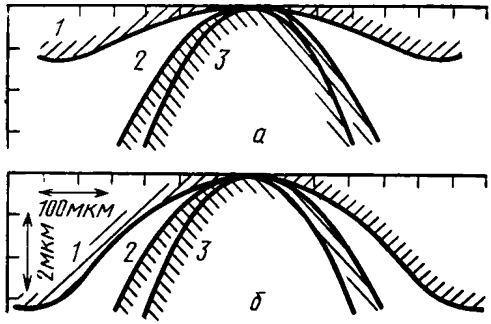
Измерения проведены на профилографе типа «Тэлисэрф-4» (фирма «Rank Taylor Hobson», Англия) с записью на электротермическую бумагу (черт. 3). При этом радиус кривизны дорожек качения вычисляют по формуле

$$R=a^2/2h,$$

где a — половина хорды, стягивающей дугу;

h — глубина отпечатка (стрела прогиба данного участка дуги).

Профилограммы дорожек качения



а—профилограмма дорожек качения для второго режима; *б*—профилограмма дорожек качения для четвертого режима

1—желоб; *2*—бочкообразное тело (шар после испытания); *3*—шар до испытания

Черт. 3

Профилограммы показали, что кривизна дорожек качения непостоянна на различных участках, поэтому радиус вычислялся для $^1/_3$, $^2/_3$ и для всей ширины дорожки качения. Значения радиусов кривизны дорожек качения шара и контртела, соответствующие $^2/_3$ ширины пятна контакта, приведены в табл. 3. Размеры радиусов кривизны для другой плоскости равны R_{12}=6,35 мм (шар), R_{22}= =75,00 мм (контртело).

Таблица 3

Номер режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Шар R_{11}, мм	6,933	9,625	8,820	10,100	6,933	7,628	7,888	10,100
Контртело R_{22}, мм	55,13	37,35	23,13	19,60	68,75	41,63	81,43	46,20

10. Эксперименты показали, что на рабочих поверхностях, несущих контактные нагрузки, имеют место весьма существенные пластические деформации. Для уточнения расчетов на долговечность и статическую прочность при контактном нагружении, кроме упругих деформаций, необходимо учитывать также и пластические, так как в результате формоизменения рабочих поверхностей происходит

значительное изменение условий контактирования по сравнению с исходными. На всех режимах испытаний рабочие поверхности прирабатываются и контакт шара с цилиндром преобразуется в контакт бочкообразного тела с желобом, при этом уменьшается разница кривизны, площадка контакта имеет большие отличия от эллипса и увеличивается по площади, распределение давлений становится промежуточным между точечным и линейным контактом, уменьшается уровень максимальных и средних контактных напряжений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
Рекомендуемое

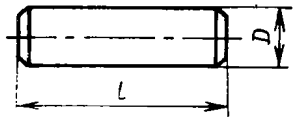
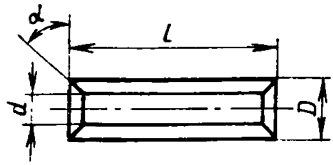
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ПРИ СЖАТИИ

1. Методы отбора образцов

1.1. Требования к вырезке заготовок для образцов, технологическому процессу их изготовления, шероховатости поверхности, изготовлению и измерению рабочей части образца и другим параметрам должны соответствовать ГОСТ 1497—73.

1.2. Рекомендуемые формы и размеры образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип образца	Чертеж	D, мм	d_0, мм	l_0, мм	α, град
Цилиндрический		10	—	10—15	—
		15		15—22	
Трубчатый		10	3	10—15	4—6
		15	5	15—22	

2. Проведение испытаний

2.1. В качестве испытательных машин применяют разрывные и универсальные испытательные машины всех систем при условии соответствия их требованиям ГОСТ 7855—74.

Требования к испытательному оборудованию, проведению испытаний и обработке результатов должны соответствовать ГОСТ 1497—73. Испытаниям подвергают не менее трех образцов.

При проведении испытаний на сжатие должно быть обеспечено надежное центрирование образца. Образцы испытывают между двумя шлифованными бойками, твердость которых должна быть выше твердости образца на 8—10 единиц HRC.

С целью снижения контактного трения между бойком и образцом рекомендуется ставить прокладки из медной фольги, покрытые консистентным смазочным материалом.

Увеличение нагрузки производят ступенями в 5000—10000 Н (500—1000 кгс) до разрушения образца.

Механические характеристики материала (при растяжении или сжатии) определяют исходя из зависимости

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i), \qquad (1)$$

где σ_i и ε_i — интенсивности напряжений и деформации соответственно.

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

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2}\ , \qquad (3)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — главные напряжения;

ε_1, ε_2, ε_3 — главные деформации.

Зависимость (1) получают экспериментально обычно при одноосном напряженном состоянии.

При одноосном сжатии имеем

$$\sigma_1=0;\ \sigma_2=0;\ \sigma_3 = -\frac{P}{F}\ ; \qquad \varepsilon_1=\varepsilon_2=-\frac{\varepsilon_3}{2}\ ; \qquad \varepsilon_3=-\ln\frac{l}{l_0}\ ,$$

где l — текущая длина образца;

l_0 — начальная расчетная длина образца;

ε_1 — деформация в окружном направлении (деформация растяжения);

ε_2 — деформация в радиальном направлении (деформация растяжения);

ε_3 — деформация в осевом направлении (деформация сжатия).

2.2. Контроль соблюдения одноосного сжатия

Контактное трение и другие факторы могут привести к тому, что напряженно-деформированное состояние даже на значительном расстоянии от торцов образца будет существенно отличаться от одноосного сжатия. Поэтому в процессе испытаний рекомендуется проводить контроль деформированного состояния, при котором проверяют соблюдение равенства

$$\varepsilon_1=\varepsilon_2=-\frac{\varepsilon_3}{2}\ . \qquad (4)$$

Для проверки равенства (4) на боковой поверхности образца методом царапания наносят квадрат с размерами сторон 300 мкм. Основания квадрата параллельны торцам образца. После каждой ступени нагружения образец снимают с испытательной машины, измеряют размеры сторон квадрата на микроскопе с погрешностью 0,0005 мм и вычисляют значения $\Delta\varepsilon_{1i}$ и $\Delta\varepsilon_{3i}$.

Результаты испытаний являются корректными, если выполняется условие

$$0 \geqslant \frac{\varepsilon_{1i}}{\varepsilon_{3i}} \geqslant -0{,}90. \qquad (5)$$

Величины $\Delta\varepsilon_{1i}$ и $\Delta\varepsilon_{3i}$ для i-ой ступени нагружения вычисляют по формулам

$$\Delta\varepsilon_{1i}=\ln\frac{b_i}{b_{i-1}}\ ; \qquad \Delta\varepsilon_{3i}=\ln\frac{h_i}{h_{i-1}}\ ;\ (i=1,2,3\ldots),$$

где b_i — размер стороны квадрата в окружном направлении после i-ой ступени нагружения, мкм;

h_i — размер стороны квадрата в осевом направлении после i-ой ступени нагружения, мкм.

Если отношение $\frac{\Delta\varepsilon_{1i}}{\Delta\varepsilon_{3i}}$ на какой-либо ступени нагружения не удовлетворяют условию (5), то следует продолжать испытания с соответствующим измерением деформаций сторон квадрата b_i и h_i еще на две ступени нагружения и

вычислить отношение $\frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_3}$ для суммарной деформации сторон квадрата b и h на последних трех ступенях нагружения. Если условие (5) удовлетворяется, испытания следует продолжать. Если условие (5) не удовлетворяется, испытания прекращают, поскольку одноосного сжатия не происходит. В этом случае следует считать, что материал образца не имеет физического предела прочности при сжатии и принять временное сопротивление материала при сжатии $\sigma_{вс}$ равным временному сопротивлению материала при растяжении $\sigma_{вр}$.

Временное сопротивление материала образца при сжатии ($\sigma_{вс}$) вычисляют по формуле

$$\sigma_{вс} = \frac{P_{max}}{F_0},$$

где P_{max} — наибольшая нагрузка испытаний при разрушении образца;

F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца.

За значение временного сопротивления материала при сжатии принимают среднее арифметическое результатов отдельных испытаний образцов.

2.3. Пример определения временного сопротивления при сжатии стали марки ШХ15

2.3.1. Требования к испытательному оборудованию — по ГОСТ 1497—73.

2.3.2. Оборудование — испытательная машина фирмы «Инстрон» модели 1255.

2.3.3. Образец — цилиндр диаметром 10 мм, длиной 10 мм. Материал образца — подшипниковая сталь марки ШХ15.

Твердость образца — HRC 44.

Шероховатость поверхности рабочей части образца — $Ra \leqslant 0{,}32$ мкм по ГОСТ 2789—73.

2.3.4. При проведении испытаний образцы устанавливали между двумя плоскими шлифованными бойками, твердость которых составляла HRC 65. С целью снижения контактного трения между бойком и образцом ставилась прокладка из медной фольги толщиной 0,3 мм, покрытая консистентным смазочным материалом «ЦИАТИМ-201». Увеличение нагрузки проводилось ступенями $\Delta P = 10000$ Н $\sim$ 1000 кгс) до разрушения образца.

Таблица 2

Номер ступени нагружения	Нагрузка P, Н	Размеры квадрата, мкм		$\Delta\varepsilon_{1l}$	$\Delta\varepsilon_{3l}$	$\frac{\Delta\varepsilon_{1l}}{\Delta\varepsilon_{3l}}$
		b_l	h_l			
0	0	1000,0	1000,0	0	0	0
1	120000	1000,5	999,0	0,00050	—0,00100	—0,65
2	130000	1003,0	995,0	0,00250	—0,00402	—0,62
3	140000	1005,0	991,5	0,00199	—0,00353	—0,56
4	150000	1007,5	988,0	0,00249	—0,00354	—0,70
5	160000	1010,5	984,0	0,00298	—0,00406	—0,73
6	170000	1012,5	981,5	0,00198	—0,00255	—0,77
7	180000	1014,0	979,5	0,00148	—0,00204	—0,72
8	185000	1015,5	977,5	0,00148	—0,00204	—0,72
9	190000	1017,5	975,0	0,00197	—0,00256	—0,77
10	195000	1020,0	971,5	0,00246	—0,00360	—0,68
11	200000	1023,0	967,0	0,00294	—0,00465	—0,63
12	205000	1025,0	964,5	0,00196	—0,00259	—0,75

2.3.5. Для контроля соблюдения одноосного сжатия на боковой поверхности образца методом царапания алмазным наконечником твердомера наносили квадрат с размерами сторон 1000×1000 мкм. После каждой ступени нагружения размеры сторон измеряют на микроскопе с погрешностью 0,0005 мкм. Результаты измерения сторон квадрата приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что условие (5) выполнялось на всех ступенях нагружения образца.

2.3.6. В момент разрушения образца нагрузка равнялась 210000 Н. Временное сопротивление при сжатии составило

$$\sigma_{вс} = \frac{P_{max}}{F_0} = \frac{210000}{0{,}785 \cdot 10^2} = 2675 \text{ МПа } (272{,}7 \text{ кгс/мм}^2).$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 6
Рекомендуемое

ПРИМЕР РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА И АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЛЕВОЙ ВЕТВИ КРИВОЙ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ ДЛЯ СХЕМЫ КАЧЕНИЯ С ВНЕШНЕЙ КАСАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

1. Требования к испытательному оборудованию — по разд. 2 настоящего стандарта.

Оборудование — испытательная машина типа МКВ-КМ, моделирующая схему нагружения качения с внешней касательной нагрузкой (см. рекомендуемое приложение 7).

2. Условия испытаний — по разд. 3 настоящего стандарта. Частота нагружения образца — 1000 Гц.

Смазочный материал образца и контртел — масло «Индустриальное 20». На каждом режиме испытаний испытывали по 18 образцов. Испытания проводились на ограниченной базе. Значения баз испытаний определяли по п. 3,11 настоящего стандарта. Режимы испытаний образцов приведены в табл. 1. В качестве расчетного напряжения в зоне контакта принято эквивалентное напряжение (см. п. 1.7.6 настоящего стандарта). Критерием разрушения являлось наличие на контактной поверхности единичного выкрашивания диаметром, превышающим 50% малой полуоси пятна контакта (см. п. 3.16 настоящего стандарта). Момент разрушения фиксировался электронным автоматическим выключателем (см. рекомендуемое приложение 8).

3. Отбор образцов и контртел — по разд. 4 настоящего стандарта. Образец (рабочая часть) — сфера диаметром 6 мм. Контртело — цилиндрический диск диаметром 150 мм.

Твердость образцов и контртел — HRC 62.

Шероховатость поверхности рабочей части образца — $Ra \leqslant 0{,}32$ мкм по ГОСТ 2789—73.

4. Расчет максимальных нормальных напряжений в зоне контакта проведен по разд. 1 настоящего стандарта и рекомендуемому приложению 2.

Для контакта сферы с цилиндром (при $E_1=E_2=21{,}08\cdot10^4$ МПа$=2{,}15\cdot10^4$ кгс/мм^2 и $\mu_1=\mu_2=0{,}3$) формулы для расчета напряжения $\sigma_{z\max}$ имеют вид (см. рекомендуемое приложение 2)

$$\sigma_{z\max}=863{,}54 n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}+\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{3}} \text{ (МПа)}; \tag{1}$$

$$\sigma_{z\max}=188{,}48 n_\sigma P^{\frac{1}{3}}\left(\frac{4}{d}+\frac{1}{R}\right)^{\frac{2}{3}} \text{ (кгс/мм}^2\text{)}. \tag{2}$$

5. Расчет напряжений с учетом касательных нагрузок проведен по разд. 1 для наиболее напряженной точки, лежащей на конце малой полуоси площадки контакта.

Для эллиптической площадки контакта по формулам п. 1.7.3 настоящего стандарта вычисляем относительные напряжения $\bar{\sigma}_x$ и $\bar{\sigma}_y$.

В окончательном виде формулы для расчета $\bar{\sigma}_x$ и $\bar{\sigma}_y$ имеют вид

$$\bar{\sigma}_x=-0{,}1326+0{,}4473\frac{T}{P}; \tag{3}$$

$$\bar{\sigma}_y=0{,}1326+1{,}6180\frac{T}{P}. \tag{4}$$

Таблица 1

Номер режима испытаний	P, H (кгс)	T, H (кгс)	$\sigma_{z\max}$, МПа (кгс/мм²)	$\sigma_1=\sigma_y$, МПа (кгс/мм²)	$\sigma_3=\sigma_x$, МПа (кгс/мм²)	$\sigma_{экв}$, МПа (кгс/мм²)
1	396,2 (40,40)	0,0 (0,00)	4905,0 (500,00)	650,4 (66,30)	—650,4 (—66,30)	821,1 (82,70)
2	396,2 (40,40)	14,7 (1,50)	4905,0 (500,00)	945,1 (96,34)	—569,0 (—58,00)	1037,3 (105,74)
3	396,2 (40,40)	19,6 (2,00)	4905,0 (500,00)	1043,3 (106,35)	—541,8 (—55,23)	1120,0 (114,17)
4	396,2 (40,40)	38,1 (3,88)	4905,0 (500,00)	1412,6 (144,00)	—439,7 (—44,82)	1417,3 (144,48)
5	527,9 (53,81)	27,5 (2,80)	5395,5 (550,00)	1169,7 (119,24)	—589,9 (—60,13)	1250,0 (127,42)
6	871,1 (88,80)	21,6 (2,20)	6376,5 (650,00)	1111,0 (113,25)	—774,9 (—78,99)	1258,3 (128,27)
7	871,1 (88,80)	38,1 (3,88)	6376,5 (650,00)	1296,3 (132,14)	—720,9 (—73,49)	1407,9 (143,52)

По п. 1.7.4 настоящего стандарта определяем напряжения σ_x и σ_y

$$\sigma_x = (-0,1326 + 0,4473 \frac{T}{P})\sigma_{z\max}; \quad (5)$$

$$\sigma_y = (0,1326 + 1,6180 \frac{T}{P})\sigma_{z\max}. \quad (6)$$

Для двухосного напряженного состояния имеем

$$\sigma_1 = \sigma_y;\ \sigma_2 = 0;\ \sigma_3 = \sigma_x.$$

По п. 1.7.6 настоящего стандарта определяем значения эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$. При расчете эквивалентных напряжений значения коэффициента χ и параметра A определяли по результатам испытаний образцов на растяжение, сжатие и кручение. Образцы изготовлены из стали марки ШХ15 и термообработаны по стандартному режиму твердости HRC 61—62. Значения временных сопротивлений материала при растяжении и сжатии составляли

$$\sigma_{вр} = 1903 \text{ МПа } (194 \text{ кгс/мм}^2);\ \sigma_{вс} = 2943 \text{ МПа } (300 \text{ кгс/мм}^2).$$

Значение χ составило 0,65.

Значение предела прочности материала при кручении $\tau_{пч} = 2256$ МПа (230 кгс/мм^2), а значение $A = 0,431$.

Значения напряжений $\sigma_{z\max}$, $\sigma_1 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_x$, $\sigma_{экв}$ для каждого режима испытаний приведены в табл. 1.

6. Результаты испытаний образцов на контактную усталость подвергали статистической оценке. По разд. 6 настоящего стандарта для каждого режима испытаний оценивали параметры функций распределения контактно-усталостных ресурсов ($\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$). Параметры функций распределения и графики функций приведены в табл. 2 и на черт. 1.

Таблица 2

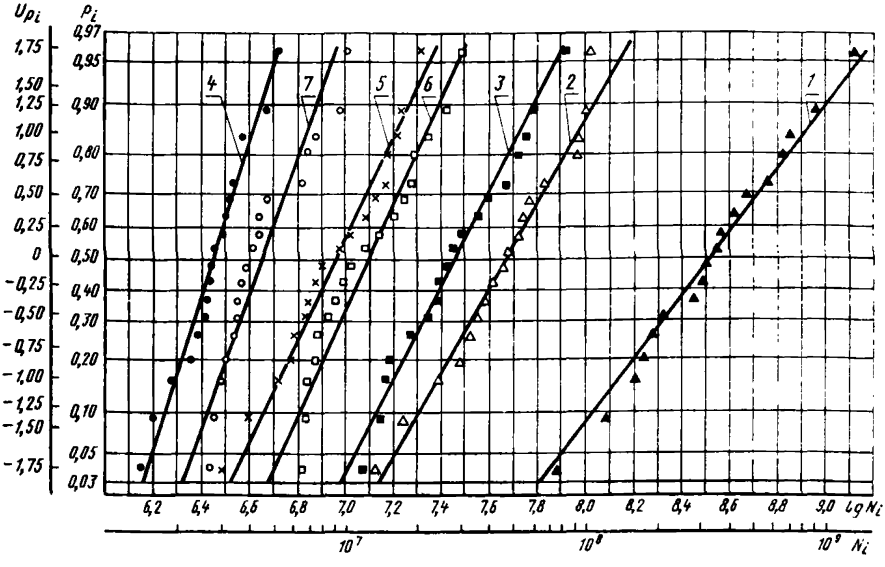
Номер режима испытаний	$\overline{\lg N}$	$N \cdot 10^{-6}$ (цикл)	$S_{\lg N}$	$S^2_{\lg N}$
1	8,5185	329,98	0,334	0,112
2	7,6745	47,26	0,286	0,082
3	7,4576	28,68	0,258	0,067
4	6,4546	2,85	0,158	0,025
5	6,9559	9,04	0,247	0,061
6	7,0914	12,34	0,228	0,052
7	6,6567	4,54	0,184	0,034

7. Аналитическое описание левой ветви кривой контактной усталости методом регрессионного анализа

7.1. По рекомендуемому приложению 15 проверяем однородность дисперсий на заданных режимах испытаний. Проверку однородности дисперсий проводили по критерию Кохрена.

$$G = \frac{(S^2_{\lg N})_{\max}}{\sum\limits_{i=1}^{m} (S^2_{\lg N})_i} = \frac{0,112}{0,433} = 0,259.$$

Графики функций распределения контактно-усталостного ресурса



1—$\sigma_{\text{экв}}$=811,29 МПа (82,70 кгс/мм²); *2*—$\sigma_{\text{экв}}$=1037,31 МПа (105,74 кгс/мм²); *3*—$\sigma_{\text{экв}}$=1120 МПа (114,17 кгс/мм²); *4*—$\sigma_{\text{экв}}$=1417,35 МПа (144,48 кгс/мм²); *5*—$\sigma_{\text{экв}}$=1250 МПа (127,42 кгс/мм²); *6*—$\sigma_{\text{экв}}$=1258,33 МПа (128,27 кгс/мм²); *7*—$\sigma_{\text{экв}}$=1407,93 МПа (143,52 кгс/мм²)

Черт. 1

Задаваясь уровнем значимости $\alpha=0{,}05$ при числах степеней свободы $K_1=n-1=18-1=17$ и $K_2=m=7$, по табл. 11 справочного приложение 3 определяем $G_{0{,}05}=0{,}274$. $G<G_{0{,}05}$ — гипотеза об однородности дисперсий принимается.

7.2. По п. 5 рекомендуемого приложения 12 методом наименьших квадратов оцениваем параметры уравнения эмпирической линии регрессии. Последовательность вычисления параметров приведена в табл. 3.

При расчете параметров уравнения принимаем $\omega_i=1$, так как дисперсии однородны

$$\bar{X}=\frac{\sum\limits_{l=1}^{m} n_l X_l}{\sum\limits_{l=1}^{m} n_l}=\frac{15233{,}4000}{126}=120{,}9000;$$

$$a=\bar{\bar{y}}=\frac{\sum\limits_{l=1}^{m} n_l \bar{y}_l}{\sum\limits_{l=1}^{m} n_l}=\frac{914{,}5656}{126}=7{,}2584;$$

$$b=\frac{\sum\limits_{l=1}^{m} n_l \bar{y}_l (X_l-\bar{X})}{\sum\limits_{l=1}^{m} n_l (X_l-\bar{X})^2}=\frac{-1647{,}9311}{399741{,}2851}=-0{,}0315;$$

$$\hat{y}_l=7{,}2584-0{,}0315(X_l-120{,}9000).$$

Таблица 3

Номер режима испытаний	$\frac{(\sigma_{экв})_i}{9{,}81}=X_i$	n_i	$\overline{y}_i=\lg\overline{N}_i$	n_iX_i	$n_i\overline{y}_i$	$n_i\overline{y}_i(X_i-\overline{X})$	$n_i\overline{y}_i(X_i-\overline{X})^2$	$n_i(\overline{y}_i-y)^2$	$\sum_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\overline{y}_i)^2$
1	82,70	18	8,5185	1488,5959	153,3330	−5857,3207	223749,6542	0,0517	1,7043
2	105,74	18	7,6745	1903,3199	138,1410	−2094,2176	31748,3417	0,0708	1,2515
3	114,17	18	7,4576	2055,0599	134,2367	−903,4138	6079,9765	0,0032	1,2246
4	144,48	18	6,4546	2600,6399	116,1827	2739,5903	64599,5361	0,0629	0,4887
5	127,42	18	6,9559	2293,5599	125,2061	816,3442	5322,5632	0,1681	0,9600
6	128,27	18	7,0914	2308,8599	127,6451	940,7448	6933,2877	0,0777	0,8270
7	143,52	18	6,6567	2583,3599	119,8205	2710,3417	61307,9243	0,2285	0,5583

$\sum_{i=1}^{m} X_i=846{,}3000$; $\sum_{i=1}^{m} n_i=126$; $\sum_{i=1}^{m} y_i=50{,}8092$; $\sum_{i=1}^{m} n_iX_i=15233{,}4000$; $\sum_{i=1}^{m} n_i\overline{y}_i=914{,}5656$; $\sum_{i=1}^{m} n_i\overline{y}_i(X_i-\overline{X})=-1647{,}9311$;

$\sum_{i=1}^{m} n_i\overline{y}_i(X_i-\overline{X})^2=399741{,}2851$; $\sum_{i=1}^{m} n_i(\overline{y}_i-y_i)^2=0{,}6629$; $\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\overline{y}_i)^2=7{,}0144$.

7.3. По п. 6 рекомендуемого приложения 12 проверяем адекватность уравнения регрессии

$$S^2_{ад}=\frac{\sum\limits_{i=1}^{m} n_i(\bar{y}_i-\hat{y}_i)^2}{m-2}=\frac{0,6629}{5}=0,1326;$$

$$S^2_{воспр}=\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\bar{y}_i)^2}{\sum\limits_{i=1}^{m} n_i-m}=\frac{7,0144}{119}=0,0589;$$

$$F=\frac{S^2_{ад}}{S^2_{воспр}}=\frac{0,1326}{0,0589}=2,25$$

Задаваясь уровнем значимости $\alpha=0,05$, при числах степеней свободы $K_1=\sum\limits_{i=1}^{m} n_i-m=126-7=119$ и $K_2=m-2=7-2=5$ по табл. 9 справочного приложения 3 определяем $F_{0,05}=2,30$.

$F<F_{0,05}$, гипотеза об адекватности уравнения регрессии принимается.

7.4. По п. 6 рекомендуемого приложения 12 объединяем дисперсии в общую оценку

$$S^2=\frac{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\bar{y}_i)^2+\sum\limits_{i=1}^{m} n_i(\bar{y}_i-\hat{y}_i)^2}{(\sum\limits_{i=1}^{m} n_i-m)+(m-2)}=$$

$$=\frac{7,0144+0,6629}{124}=0,0619.$$

7.5. По п. 7 рекомендуемого приложения 12 проводим оценку дисперсий параметров уравнения эмпирической линии регрессии и величины

$$S^2_a=\frac{S^2}{\sum\limits_{i=1}^{m} n_i}=\frac{0,0619}{126}=0,0005;$$

$$S^2_b=\frac{S^2}{\sum\limits_{i=1}^{m} n_i(X_i-\bar{X})^2}=\frac{0,0619}{52179,63}=10^{-6};$$

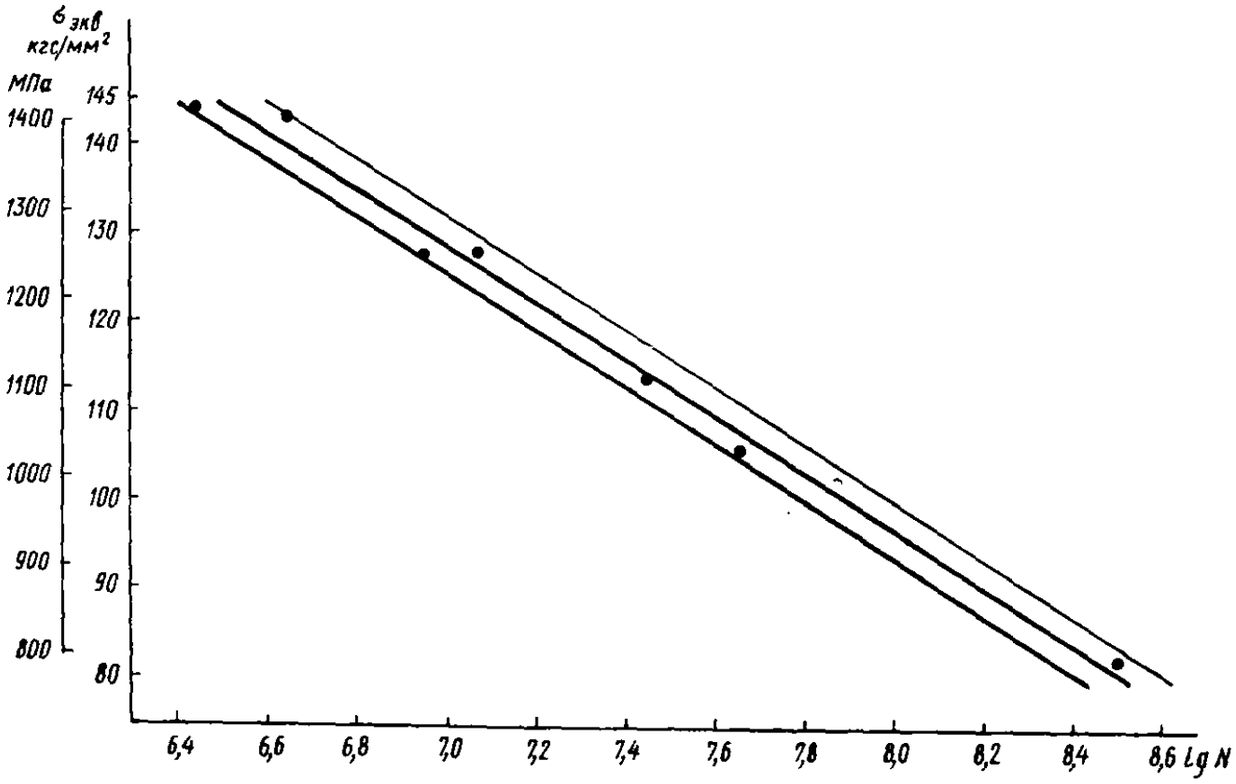
$$S^2_y=S^2_a+S^2_b(X_i-\bar{X})^2=0,0005+10^{-6}(X_i-\bar{X})^2.$$

Для уровня доверительной вероятности $\beta=0,95$ по п. 8 рекомендуемого приложения 12 определяем доверительные интервалы для параметров уравнения теоретической линии регрессии

$$7,2151<\alpha<7,3017$$
$$0,0295<\beta<0,0335$$

7.6. Кривая контактной усталости с доверительными интервалами для вероятности разрушения $P=50\%$ приведена на черт. 2.

Кривая контактной усталости



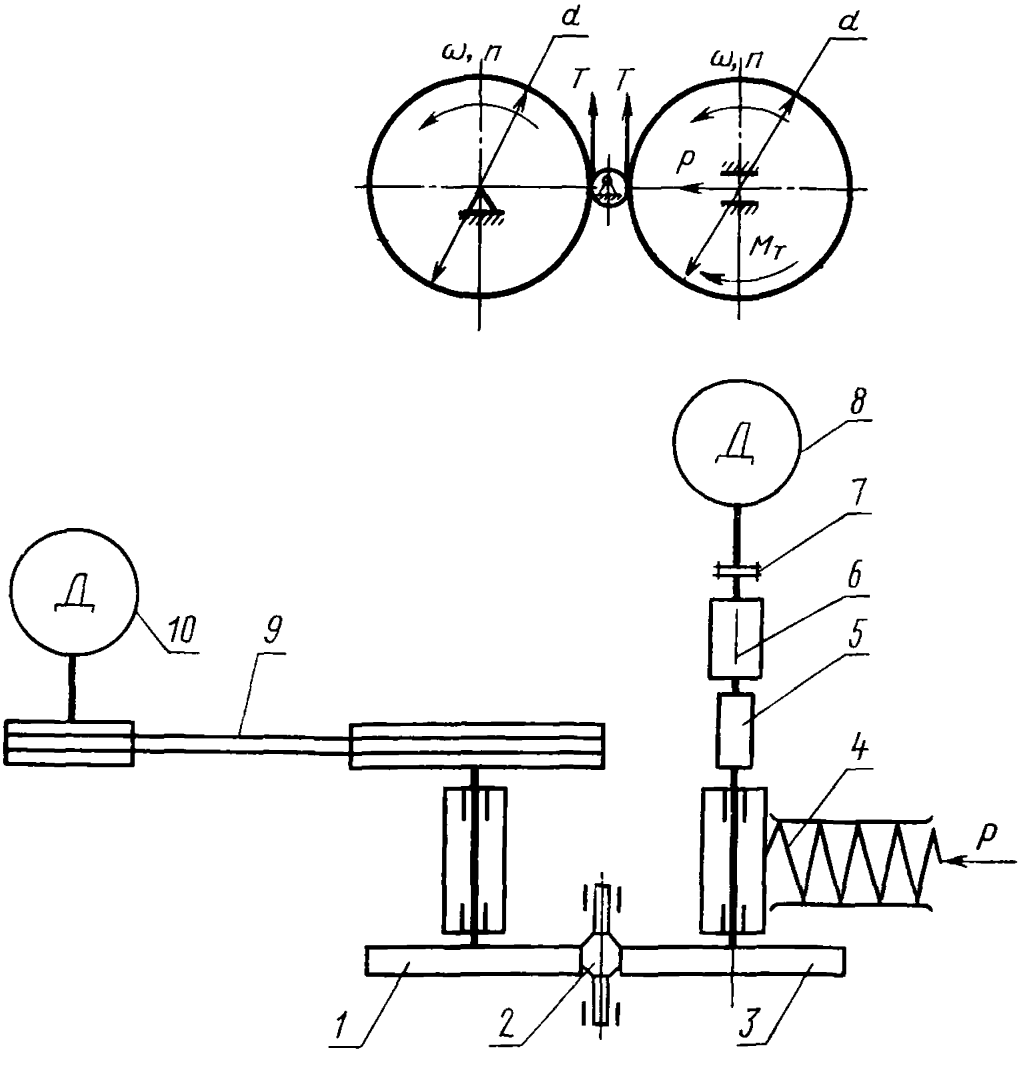
Черт. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
Рекомендуемое

ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ТИПА МКВ-КМ

1. Испытательная машина типа МКВ-КМ отвечает требованиям, изложенным в разд. 2 настоящего стандарта.

Кинематическая схема



1 — ведущее контртело; *2* — образец; *3* — ведомое контртело; *4* — пружинный механизм; *5* — тензометрическая балочка; *6* — токосъемник; *7* — упругая втулочно-пальцевая муфта; *8* — электродвигатель постоянного тока; *9* — клиноременная передача; *10* — электродвигатель переменного тока

2. Испытательная машина типа МКВ-КМ моделирует схемы качения без проскальзывания и качения с внешней касательной нагрузкой. Кинематическая схема испытательной машины приведена на чертеже. Испытания проводят путем обкатки образца между двумя контртелами по принципу фрикционной передачи с двухкикличным нагружением за один оборот образца. Вращение ведущего контртела, испытуемого образца, ведомого контртела осуществляется от электродвигателя переменного тока через клиноременную передачу. Нормальная нагрузка P задается при помощи пружинного механизма. Касательная нагрузка T в зоне контакта образца задается торможением ведомого контртела от электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, работающего в режиме динамического торможения. Задание различных значений тормозных моментов ($M_т = T \cdot \frac{d}{2}$) достигается изменением тока в обмотке возбуждения.

Передача тормозного момента от электродвигателя постоянного тока к валу ведомого контртела осуществляется через упругую втулочно-пальцевую муфту. Устройство, измеряющее тормозной момент, встроено между валом ведомого контртела и электродвигателем постоянного тока и включает в себя полую балочку с двумя наклеенными под углом 45° фольговыми тензодатчиками и токосъемник с ртутным контактом. При передаче тормозного момента тензометрическая балочка деформируется и от тензодатчиков выдается электрический сигнал, пропорциональный внешней касательной нагрузке.

Электрический сигнал при установке соответствующего уровня касательной нагрузки T регистрируется универсальным измерительным устройством.

Испытательная машина МКВ-КМ оснащена:

электронным автоматическим выключателем, фиксирующим момент выкрашивания на рабочей поверхности образца (см. приложение 8); фитильной системой смазки образца и контртел;

счетчиком числа циклов нагружения;

приспособлением для проверки точности установки образца и контртел;

приспособлениями для проверки точности нагружения образца нормальной нагрузкой P и касательной нагрузкой T.

3. Технические данные:

максимальная нормальная нагрузка P—2кН(~200 кгс);

максимальная касательная нагрузка T—50Н(~5 кгс);

мощность электродвигателя (кВт):

переменного тока — 0,50,

постоянного тока — 0,50,

частота вращения электродвигателя ($мин^{-1}$);

переменного тока— 1410,

постоянного тока — 1410,

габаритные размеры (мм):

длина — 900,

ширина — 490,

высота — 1050.

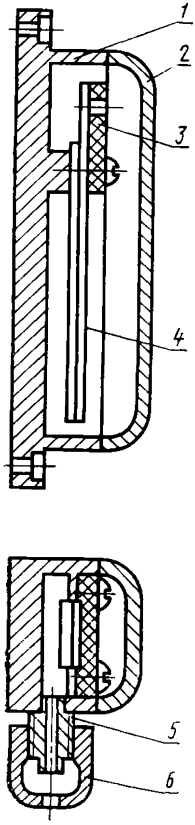
ПРИЛОЖЕНИЕ 8
Рекомендуемое

ЭЛЕКТРОННЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ К МАШИНАМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ

(конструкция Всесоюзного научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подшипниковой промышленности)

Принцип действия выключателя заключается в преобразовании вибрации, возникающей от усталостного выкрашивания образца, в электрические сигналы, которые воздействуя на электронную схему, выключают электродвигатель при помощи реле размыкания цепи кнопки «стоп» магнитного пускателя. В качестве преобразователя вибрации в электрические сигналы используется пьезодатчик (черт. 1), прикрепленный к корпусу машины.

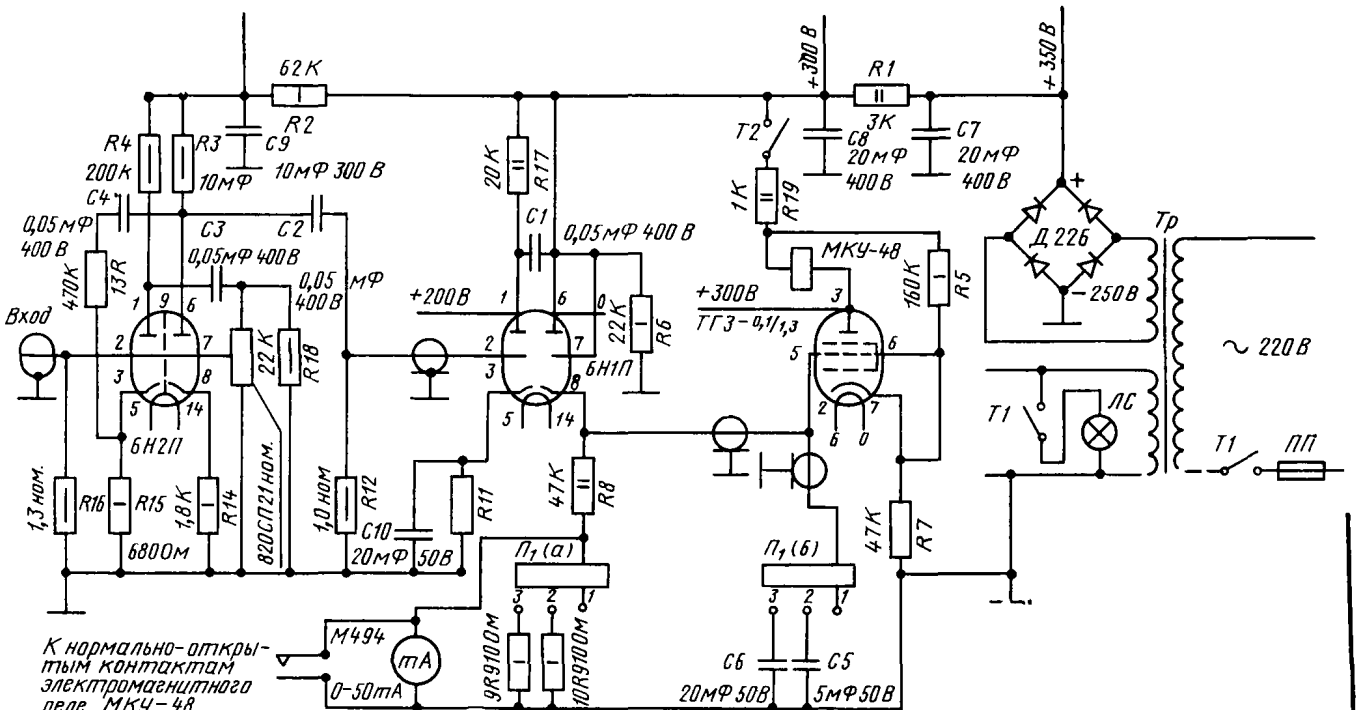
Пьезодатчик



1 — корпус; *2* — крышка; *3* — планка; *4* — пьезодатчик: *5* — втулка; *6*—гайка

Черт. 1

Электронный усилитель



Черт. 2

Электронный усилитель (черт. 2) выполнен в виде отдельного блока, который вставляется в станину машины по направляющим втулкам и подключается в схему электропитания при помощи разъемника.

В схему электронного блока входят:

трехкаскадный усилитель сигналов, приходящих от пьезодатчика;

интегратор сигналов усталостного выкрашивания;

пиковый вольтметр;

реле МКУ-48 СРЧ для размыкания цепи катушки магнитного пускателя;

выпрямитель для питания анодных и экранных цепей ламп.

Действие электронного блока сводится к следующему. Поступающие на усилитель электрические сигналы датчика, полученные от механических импульсов усталостного выкрашивания, подаются на вход трехкаскадного реостатного усилителя, который собран на лампах *6Н2П* и *6Н1П*. Для повышения стабильности усилителя применена отрицательная обратная связь (*R*13; *R*15; *С*4). Усиленное напряжение подается на пиковый вольтметр с правого триода *6Н1П*, работающего как диод. Пиковый вольтметр служит для измерения амплитуды сигнального напряжения, снятого с выхода усилителя. Выпрямленное напряжение сигналов поступает на сетку тиратрона *ТГЗ—01/1,3*, анодная цепь которого включена в обмотку реле, предназначенного для размыкания цепи катушки магнитного пускателя электромотора машины. Отрицательное напряжение сигналов на сетке запирает тиратрон и ток в обмотке реле становится равным нулю; положительное напряжение на сетке, возникающее при усталостном выкрашивании, отпирает тиратрон, причем его максимальный анодный ток проходит через обмотку реле; реле срабатывает, размыкает цепь катушки магнитного пускателя, электродвигатель машины останавливается.

Одновременно с отключением электродвигателя замыкается цепь электромагнита механизма разгрузки, который снимает приложенную на образец испытательную нагрузку, то есть отключает усилие механизма нагружения.

Электронный блок машины может реагировать как на одиночные импульсы усталостного выкрашивания, так и на сумму этих импульсов. Для этой цели электронный блок оснащен интегратором (*R9*; *С5*; *R10*; *С6*).

Принцип работы интегратора состоит в том, что одиночные усиленные и выпрямленные сигналы, поступая на обкладки конденсаторов *С5* и *С6*, которые соединены с сеткой тиратрона, заряжают их до потенциала, необходимого для отпирания этого тиратрона. Чем больше емкость конденсатора, тем больше число сигналов необходимо подать на обкладку конденсатора, чтобы зарядить его до нужного потенциала.

Интегратор электронного блока имеет три контура:

1 — реле срабатывает от одиночного импульса усталостного выкрашивания и от случайного постороннего механического толчка;

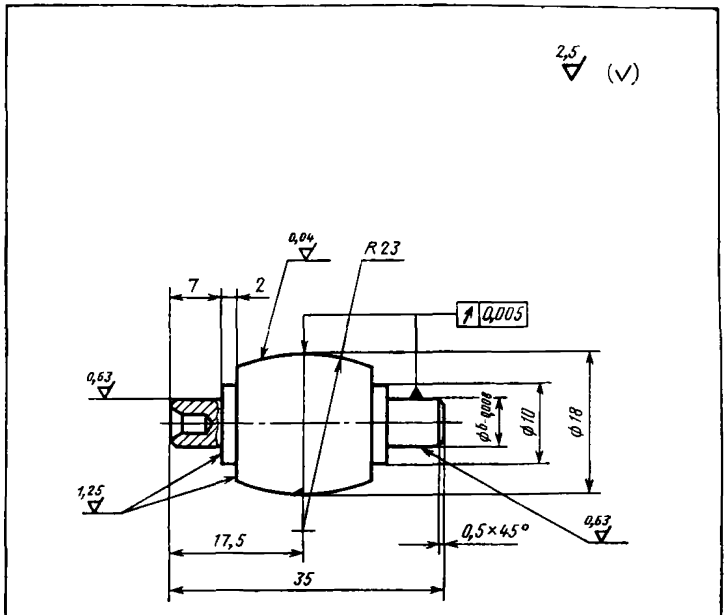
2 — в зависимости от введения переменного сопротивления реле срабатывает через 0,3—0,5 с после усталостного выкрашивания;

3 — в зависимости от введения переменного сопротивления реле срабатывает через 2—3 с после усталостного выкрашивания.

Контур *1* включается при проведении специальных исследований. При проведении серийных испытаний включается контур *2* и *3*.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9
Рекомендуемое

ПРИМЕРЫ РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ

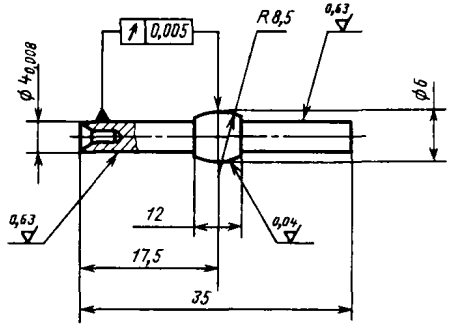


1. Неуказанные предельные отклонения валов h12.
2. Отверстие центровое А 1,6 ГОСТ 14034–74.
3. Механическая обработка с охлаждением.
4. Шлифование без ожогов.
5. Твердость: HRC _____, HB _____.
6. Острые кромки притупить R0,3.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Образец I типа	Лит	Масса	Масштаб
Разраб.								2:1
Пров.						Лист 1	Листов 1	
Т. контр.								
Н. контр.								
Утв.								

Черт. 1

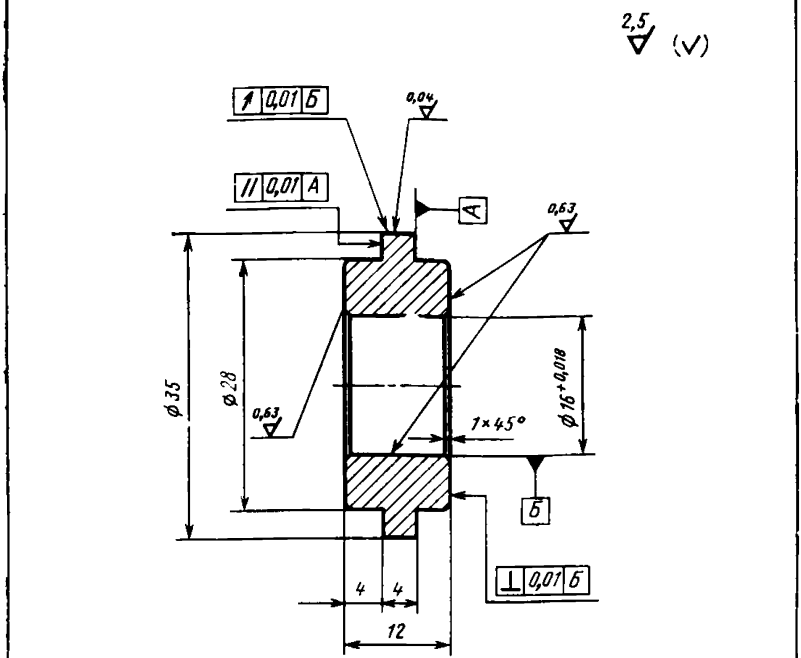
2,5 (√)



1. Неуказанные предельные отклонения валов h12.
2. Отверстие центровое А1 ГОСТ 14034–74.
3. Острые кромки притупить R 0,3.
4. Механическая обработка с охлаждением.
5. Шлифование без ожогов.
6. Твердость: HRC _____, HB _____.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Образец II типа	Лит	Масса	Масштаб
Разраб.								2:1
Пров.								
Т. контр.						Лист 1	Листов 1	
Н. контр.								
Утв.								

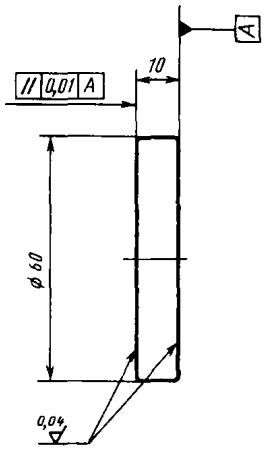
Черт. 2



1. Неуказанные предельные отклонения валов h12.
2. Острые кромки притупить R 0,3.
3. Механическая обработка с охлаждением.
4. Шлифование без ожогов.
5. Твердость: HRC _____, HB _____.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Образец III типа	Лит	Масса	Масштаб
Разраб.								2:1
Пров.						Лист 1	Листов 1	
Т. контр.								
Н. контр.								
Утв.								

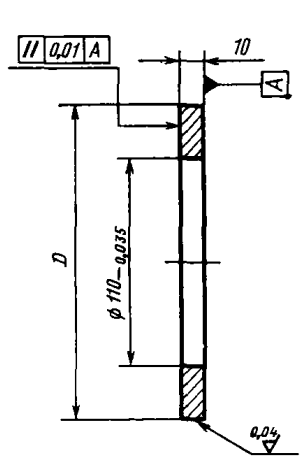
Черт. 3



1. Неуказанные предельные отклонения валов h12.
2. Механическая обработка с охлаждением.
3. Шлифование без ожогов.
4. Твердость: HRC _____, HB _____.
5. Острые кромки притупить.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Образец IV типа	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								1:1
Пров.								
Т. контр.						Лист 1		Листов 1
Н. контр.								
Утв.								

Черт. 4

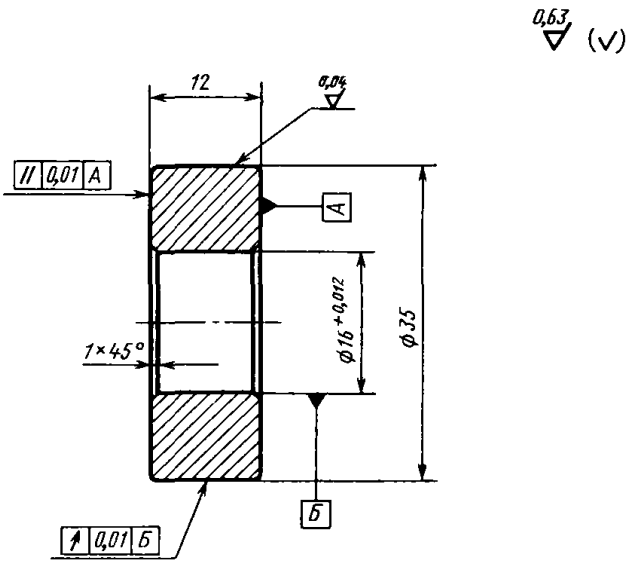


Тип контртела	D, мм
I	138
II	150

1. Неуказанные предельные отклонения валов h 12.
2. Механическая обработка с охлаждением.
3. Шлифование без ожогов.
4. Твердость: HRC _____, HB _____.
5. Острые кромки притупить R 0,3.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Контртело	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								1:2
Пров.								
Т.контр.						Лист 1	Листов 1	
Н.контр.								
Утв.								

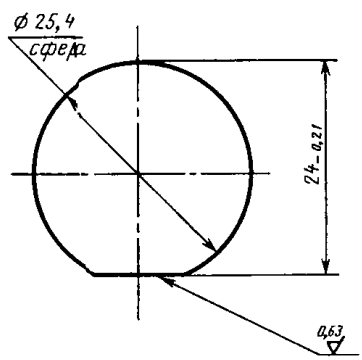
Черт. 5



1. Неуказанные предельные отклонения валов h12.
2. Острые кромки притупить R 0,3.
3. Механическая обработка с охлаждением.
4. Шлифование без ожогов.
5. Твердость: HRC _____, HB _____.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Контртело III типа	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								2:1
Пров.						Лист 1	Листов 1	
Т.контр.								
Н.контр.								
Утв.								

Черт. 6



1. Шарик II 25,4 мм ГОСТ 3722-60.
2. Механическая обработка с охлаждением.
3. Твердость HRC ____.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Контртело IV типа	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.								
Пров.								
Т.контр.						Лист 1		Листов 1
Н.контр.								
Утв.								

Черт. 7

ПРИЛОЖЕНИЕ 10
Рекомендуемое

ПРОТОКОЛ

испытаний образца на контактную усталость (приложение к сводному протоколу №_____)

Назначение испытаний:

Образец: Шифр_____ основные размеры_____

Машина: тип _____, частота_____

Амплитуда напряжений цикла $(\sigma_{z\max})$, $(\sigma_{экв})_{\max}$, $(\sigma_{z\max})_a$ _____

Среднее напряжение цикла $(\sigma_{z\max})_m$ _____

Наибольшее напряжение цикла $(\sigma_{z\max})$, $(\sigma_{экв})_{\max}$, $(\sigma_{z\max})_a + (\sigma_{z\max})_m$ _____

Наименьшее напряжение цикла $(\sigma_{z\max})_a - (\sigma_{z\max})_m$ _____

Нормальная нагрузка цикла (P) _____

Касательная нагрузка цикла (T) _____

Средняя нормальная нагрузка цикла (P_m) _____

Амплитудная нормальная нагрузка цикла (P_a) _____

Биение (в мм): образца_____, контртела _____

Дата	Время		Показания счетчика		Число циклов за смену	Примечание
	в начале смены	в конце смены	в начале смены	в конце смены		

Испытания проводил_____
(подпись)

Зав. лабораторией_____
(подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 11
Рекомендуемое

СВОДНЫЙ ПРОТОКОЛ

Цель испытаний _____

_____

_____

Материал:

марка и состояние _____

направление волокна _____

тип заготовки (при сложной форме прилагается план вырезки образцов)

_____

Условия испытаний:

схема нагружения _____

частота циклов нагружения _____

база испытаний _____

коэффициент, учитывающий соотношение между нормальной и касательной нагрузками на контакте (K) _____

Относительная величина проскальзывания между образцом и контртелом (λ_{C_x}) _____

Смазка:

наименование _____ ГОСТ или ТУ _____

способ подвода _____

температура _____

Форма и основные размеры:

образцов _____

контртел _____

Состояние поверхности:

образцов _____

контртел _____

Твердость по шкалам Бринелля или Роквелла

образцов_____

контртел_____

Испытательная машина

Тип_____, №_____

Шифр образца	$\sigma_{наиб}$	$(\sigma_{zmax})_a$	$(\sigma_{zmax})_m$	Число циклов	Отметка о разрушении образца (да, нет)	Размер и число выкрашиваний

Испытания проводил_____
(подпись)

Зав. лабораторией_____
(подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 12
Рекомендуемое

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЛЕВОЙ ВЕТВИ КРИВОЙ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

1. Метод регрессионного анализа позволяет получить:

параметры уравнения левой ветви кривой контактной усталости, соответствующие вероятности разрушения $P=50\%$, при ограниченном объеме партии образцов для испытаний;

параметры уравнений левых ветвей кривых контактной усталости с доверительными интервалами для различных уровней вероятности разрушения, при испытаниях в статистическом аспекте.

При регрессионном анализе за независимую величину принимают $x=f_1(\sigma_{\text{нанб}})$, зависимой величиной является $y=f_2(N)$.

Вид функции $x=f_1(\sigma_{\text{нанб}})$ выбирают из условия линейности зависимости $y=f(x)$. Условию линейности обычно удовлетворяет экспоненциальное и степенное уравнение кривой контактной усталости. При этом функция $x=f_1(\sigma_{\text{нанб}})$ выражается как $x=\sigma_{\text{нанб}}$ или $x=\lg \sigma_{\text{нанб}}$.

2. В основе регрессионного анализа лежат следующие постулаты:

при каждом значении $x=\sigma_{\text{нанб}}$ или $x=\lg \sigma_{\text{нанб}}$ величина $y=\lg N$ распределена нормально;

среднее значение логарифма чисел циклов $\overline{y}=\lg \overline{N}$, соответствующее данному значению x, является линейной функцией x.

При этом уравнение теоретической линии регрессии имеет вид

$$\eta=a+\beta(x-\overline{x}); \qquad (1)$$

зависимость дисперсии величины y от уровня напряжения должна быть известна.

Дисперсии на заданных уровнях напряжений могут быть однородны. Дисперсия может быть обратно пропорциональна напряжению, то есть

$$\sigma^2=\sigma_0^2\frac{1}{\omega(x)}, \qquad (2)$$

где σ_0^2 — параметр.

Зависимость $\omega(x)$ устанавливается на основании опытных данных и может быть представлена в аналитической и в графической формах.

Оценкой уравнения теоретической линии регрессии является уравнение эмпирической линии

$$\hat{y}=a+b(x-\overline{x}). \qquad (3)$$

3. По п. 6.1.3 настоящего стандарта оцениваем параметры функций распределения контактно-усталостных ресурсов ($\overline{\lg N}$; $S_{\lg N}$) для заданных уровней напряжения.

4. По рекомендуемому приложению 15 проверяем однородность дисперсий на заданных уровнях напряжения. При независимости дисперсий от уровня напряжения в формулах (4—6; 8—13) принимаем $\omega_i=1$.

5. Методом наименьших квадратов оценивают параметры уравнения эмпирической линии регрессии

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i x_i}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i}; \tag{4}$$

$$a=\bar{y}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i}; \tag{5}$$

$$b=\frac{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i (x_i-\bar{x})y_i}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i (x_i-\bar{x})^2}, \tag{6}$$

$\omega_i n_i$ — «веса» точек;

m — число уровней напряжений;

n_i — число образцов, испытанных на заданном уровне напряжения ($i=1, 2, 3, \ldots, m$);

$\bar{y}_i=\overline{\lg N_i}$ — см. п. 6.1.3 настоящего стандарта.

6. Адекватность уравнения регрессии проверяют по F-критерию Фишера.

$$F=\frac{S^2_{ад}}{S^2_{воспр}}; \tag{7}$$

$$S^2_{ад}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i (\bar{y}_i-\hat{y}_i)^2}{m-2}; \tag{8}$$

$$S^2_{воспр}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\omega_i (y_{ij}-\bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{m} n_i-m}, \tag{9}$$

где $S^2_{ад}$ — дисперсия адекватности;

$S^2_{воспр}$ — дисперсия воспроизводимости;

n_i — число образцов, испытанных на i-ом уровне напряжения;

$y_i=\lg N_{ij}$ — значение логарифма чисел циклов j-го образца, испытанного на i-ом уровне напряжения;

$\hat{y}_i$ — значение логарифма чисел циклов на i-ом режиме нагружения, рассчитанное по уравнению регрессии.

При проведении испытаний на ограниченной базе (см. п. 3.11 настоящего стандарта) при расчете дисперсии воспроизводимости ($S^2_{воспр}$) значения y_{ij}, превышающие значения ограниченной базы испытаний, определяют экстраполяцией прямых, аппроксимирующих функции распределения контактно-усталостных ресурсов.

Если рассчитанное значение F-критерия не превышает указанного в табл. 9 приложения 3 для уровня значимости α (обычно $\alpha=0{,}05$) и чисел степеней свободы $K_1=\sum_{i=1}^{m} n_i - m$ и $K_2=m-2$, то регрессионное уравнение адекватно. При этом дисперсии объединяют в общую оценку

$$S^2=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i}\omega_i(y_{ij}-\bar{y}_i)^2+\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i(\bar{y}_i-\hat{y}_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^{m} n_i-m\right)+(m-2)}. \qquad (10)$$

7. Оценку дисперсий параметров уравнения эмпирической линии регрессии и величины $\hat{y}$ производят по формулам:

$$S_a^2=\frac{S^2}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i}; \qquad (11)$$

$$S_b^2=\frac{S^2}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i n_i (X_i-\bar{X})^2}; \qquad (12)$$

$$S_{\hat{y}}^2=S_a^2+S_b^2(X_i-\bar{X})^2. \qquad (13)$$

8. Доверительные интервалы для параметров уравнения теоретической линии регрессии и генерального среднего значения вычисляют по формулам:

$$a-t_{\beta k}\cdot S_a<\alpha<a+t_{\beta k}\cdot S_a; \qquad (14)$$

$$b-t_{\beta k}\cdot S_b<\beta<b+t_{\beta k}\cdot S_b; \qquad (15)$$

$$\hat{y}-t_{\beta k}\cdot S_{\hat{y}}<\eta<\hat{y}+t_{\beta k}\cdot S_{\hat{y}}, \qquad (16)$$

где $t_{\beta k}$ — критерий Стьюдента, определяемый по табл. 7, приложения 3 для доверительной вероятности β и числа степеней свободы $K=\sum_{i=1}^{m} n_i-2$.

9. Используя регрессионное уравнение и зависимость дисперсии величины y от уровня напряжения, строят кривые контактной усталости для различных уровней вероятности разрушения. Оценку ресурса при напряжении $(\sigma_{\text{наиб}})_i$ и уровне вероятности разрушения производят по формуле

$$N_{P_i}=\exp[2{,}3026(u_P\cdot S_i+\hat{y}_i)]. \qquad (17)$$

10. Примеры расчета регрессионного уравнения кривой контактной усталости приведены в рекомендуемом приложении 6 и рекомендациях РС 1483—68.

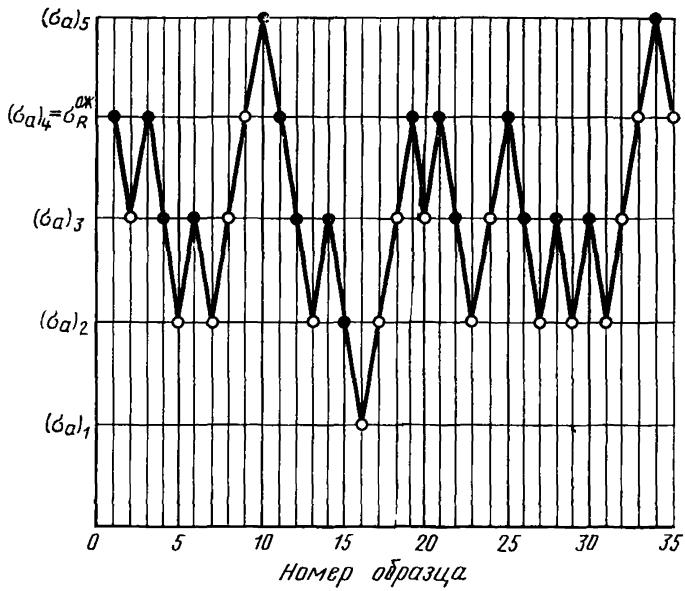
ПРИЛОЖЕНИЕ 13
Рекомендуемое

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ СТУПЕНЧАТОГО ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

1. Метод ступенчатого увеличения нагрузки (см. чертеж) применяют для определения среднего значения предела контактной выносливости $\overline{\sigma}_R$ и его среднего квадратического отклонения S_{σ_R}.

2. Метод предусматривает испытания образцов до разрушения или базового числа циклов. Число образцов и базу испытаний выбирают по пп. 3.9 и 3.10.

Последовательность испытания образцов методом ступенчатого изменения напряжений



● — образец разрушился
○ — образец не разрушился

3. Последовательность испытаний образцов приведена на чертеже и заключается в следующем:

первый образец испытывают на уровне ожидаемого значения предела контактной выносливости;

при разрушении первого образца второй испытывают при более низком значении напряжения, а если образец не разрушится — при более высоком значении;

уровень напряжения для каждого последующего образца понижается, если предыдущий образец разрушается, и повышается — если предыдущий образец не разрушился.

4. Разность между уровнями напряжений составляет 2% от ожидаемого значения предела контактной выносливости.

5. Составляют таблицу, в которой указывают для каждого значения напряжений число разрушенных и неразрушенных образцов.

Номер уровня напряжений	Напряжение $(\sigma_a)_i$	Число разрушенных образцов	Число неразрушенных образцов	Общее число образцов
1	$(\sigma_a)_1$	n_1'	n_1''	$n_1'+n_1''$
2	$(\sigma_a)_2$	n_2'	n_2''	$n_2'+n_2''$
3	$(\sigma_a)_3$	n_3'	n_3''	$n_3'+n_3''$
l	$(\sigma_a)_l$	n_l'	n_l''	$n_l'+n_l''$
		$\sum_{i=1}^{l} n_i' = M'$	$\sum_{i=1}^{l} n_i'' = M''$	$M'+M''$

6. Среднее значение предела контактной выносливости вычисляют по формуле

$$\overline{\sigma}_R = \sigma_R^{0ж} + d\left(\frac{\sum_{i=1}^{l} in_i}{M} \pm 0{,}5\right), \qquad (1)$$

где d — разность между уровнями напряжения (см. чертеж);

i — порядковый номер уровня напряжения;

M — общее число разрушений (или неразрушений) образцов:

если $M' > M''$, то $M = M''$,

если $M' < M''$, то $M = M'$;

n_i — число разрушений (или неразрушений) образцов на i-ом уровне:

если $n_i > n_i''$, то $n_i = n_i''$,

если $n_i < n_i''$, то $n_i = n_i'$.

Примечание. Знак «плюс» в формуле (1) принимается в том случае, когда $M' > M''$, а знак «минус», когда $M' < M''$.

7. Среднее квадратическое отклонение предела контактной выносливости вычисляют по формуле

$$S_{\sigma_R} = 1{,}62d\left[\frac{\sum_{i=1}^{l} (i^2 n_i) M - \left(\sum_{i=1}^{l} in_i\right)^2}{M^2} + 0{,}029\right]. \qquad (2)$$

8. Прямую, аппроксимирующую функцию распределения предела контактной выносливости, выражают уравнением

$$(\sigma_R)_{P_i} = \overline{\sigma}_R + U_{P_i} \cdot S_{\sigma_R}. \qquad (3)$$

9. Методика определения доверительных интервалов для математического ожидания, стандартного отклонения, дисперсии, аналогична изложенной в пп. 6.1.6 и 6.1.7 настоящего стандарта.

10. Зная параметры функции распределения предела контактной выносливости и доверительные интервалы строят на нормальной вероятностной бумаге график функции распределения с доверительными интервалами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 14
Рекомендуемое

ПРИМЕР ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА НА ЗАДАННОМ УРОВНЕ НАПРЯЖЕНИЯ

1. Оборудование — испытательная машина типа МКВ-КМ, моделирующая схему нагружения качения без проскальзывания (см. рекомендуемое приложение 7).

2. Условия испытаний — по разд. 3 настоящего стандарта.

Частота нагружения образца — 1000 Гц.

Смазочный материал образцов и контртел — масло «Индустриальное 20».

Задаваясь ожидаемым значением $S_{lgN}=0{,}35$, доверительной вероятностью $\beta=0{,}90$ и относительной погрешностью $\delta=20\%$, по черт. 8 п. 3.7 настоящего стандарта определяют минимальное число образцов $n=35$.

Уровень напряжения — 6000 МПа (~ 600 кгс/мм^2).

Испытания проводились на ограниченной базе.

Значение базы испытаний $N_6=350\cdot10^6$ циклов определялось по п. 3.11 настоящего стандарта.

Критерием разрушения являлось наличие на контактной поверхности единичного выкрашивания диаметром, превышающим 50% малой полуоси пятна контакта (см. п. 3.16 настоящего стандарта).

Момент разрушения фиксировался электронным автоматическим выключателем (см. рекомендуемое приложение 8).

3. Отбор образцов и контртел — по разд. 4 настоящего стандарта.

Образец со сферической рабочей частью диаметром 6 мм.

Контртело — цилиндрический диск диаметра 150 мм.

Материал образцов и контртел — подшипниковая сталь марки ШХ15.

Твердость образцов и контртел — HRC 62.

Шероховатость поверхности рабочей части образца — $Ra\leqslant0{,}32$ мкм по ГОСТ 2789—73.

4. Проведение испытаний — по разд. 5 настоящего стандарта.

5. Оценка параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса основана на логарифмически-нормальном распределении.

Вариационный ряд ресурсов образцов и первичная статистическая обработка приведены в табл. 1.

По п. 6.1.3 настоящего стандарта, используя данные табл. 1, определяем методом наименьших квадратов $\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$.

$$\overline{\lg N}=\frac{243{,}4344\cdot20{,}981-(-7{,}799)\cdot(-57{,}7235)}{30\cdot20{,}981-(7{,}799)^2}=8{,}1908;$$

$$S_{\lg N}=\frac{30\cdot(-57.7235)-(-7{,}799)\cdot243{,}4344}{30\cdot20{,}981-(7{,}799)^2}=0{,}293;$$

$$\lg N_{P_j}=8{,}1908+0{,}293U_{P_j}.$$

Задаваясь доверительной вероятностью $\beta=0{,}90$ по п. 6.1.6 настоящего стандарта определяем доверительные интервалы для математического ожидания (a), стандартного отклонения (σ) и дисперсии (σ^2).

$$8{,}1069<a<8{,}2746;$$
$$0{,}243<\sigma<0{,}362;$$
$$0{,}059<\sigma^2<0{,}131.$$

Таблица 1

j	P_j	U_{P_j}	$U_{P^*_j}$	$N_j \cdot 10^{-6}$	$\lg N_j$	$\lg N_j \cdot U_{P_j}$
1	0,014	—2,197	4,827	49,30	7,6928	—16,9011
2	0,043	—1,717	2,948	51,60	7,7126	—13,2426
3	0,071	—1,468	2,155	55,00	7,7403	—11,3628
4	0,100	—1,282	1,644	58,70	7,7686	—9,9593
5	0,129	—1,131	1,279	60,40	7,7810	—8,8003
6	0,157	—1,007	1,014	63,80	7,8048	—7,8594
7	0,186	—0,893	0,805	76,50	7,8836	—7,0716
8	0,214	—0,793	0,629	80,10	7,9036	—6,2675
9	0,243	—0,697	0,486	89,90	7,9537	—5,5437
10	0,271	—0,610	0,372	97,70	7,9898	—4,8738
11	0,300	—0,524	0,275	110,20	8,0421	—4,2141
12	0,329	—0,443	0,196	117,30	8,0692	—3,5746
13	0,357	—0,367	0,135	121,40	8,0842	—2,9669
14	0,386	—0,290	0,084	129,60	8,1126	—2,3526
15	0,414	—0,217	0,047	141,30	8,1501	—1,7685
16	0,443	—0,143	0,020	146,80	8,1666	—1,1678
17	0,471	—0,073	0,005	157,00	8,1958	—0,5983
18	0,500	0,000	0,000	173,40	8,2390	0,0000
19	0,529	0,073	0,005	179,40	8,2538	0,6025
20	0,557	0,143	0,020	180,30	8,2559	1,1806
21	0,586	0,217	0,047	182,10	8,2603	1,7924
22	0,614	0,290	0,084	189,70	8,2780	2,4006
23	0,643	0,367	0,135	202,60	8,3066	3,0485
24	0,671	0,443	0,196	217,40	8,3372	3,6934
25	0,700	0,524	0,275	222,50	8,3473	4,3740
26	0,729	0,610	0,372	241,90	8,3836	5,1140
27	0,757	0,697	0,486	243,70	8,3868	5,8456
28	0,786	0,793	0,629	252,10	8,4015	6,6624
29	0,814	0,893	0,805	274,60	8,4387	7,5357
30	0,843	1,007	1,014	311,00	8,4927	8,5522
31	—	—	—	База	—	—
32	—	—	—	База	—	—
33	—	—	—	База	—	—
34	—	—	—	База	—	—
35	—	—	—	База	—	—

$\sum_{1}^{30} U_{P_j} = -7{,}799$; $\sum_{1}^{30} U_{P_j}^2 = 20{,}981$; $\sum_{1}^{30} \lg N_j = 243{,}4344$; $\sum_{1}^{30} \lg N_j \cdot U_{P_j} = -57{,}7235$

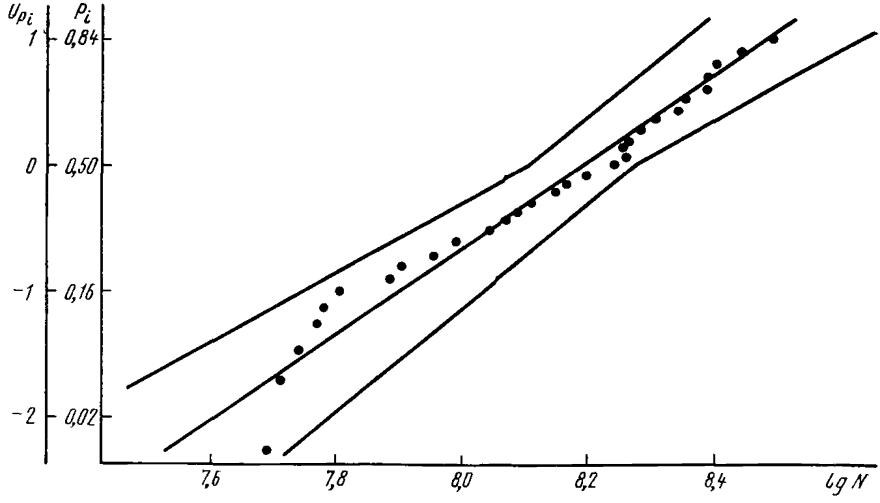
По п. 6.1.7 настоящего стандарта определяем значения координат для построения доверительных интервалов функции распределения контактно-усталостного ресурса. Полученные значения координат приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер точки	Значение ординаты		Значения абсциссы
	P_J	U_{P_J}	
1	84,10	1,00	8,3499
2	50,00	0,00	8,1069
3	15,90	−1,00	7,7454
4	84,10	1,00	8,6361
5	50,00	0,00	8,2746
6	15,90	−1,00	8,0317

График функции распределения контактно-усталостного ресурса с доверительными интервалами приведен на чертеже.

Функция распределения контактно-усталостного ресурса с доверительными интервалами



ПРИЛОЖЕНИЕ 15
Рекомендуемое

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

1. Для проведения статистического анализа необходимо:

по п. 6.1.2 настоящего стандарта построить вариационные ряды ресурсов (чисел циклов) для сравниваемых партий и произвести первичную статистическую обработку;

по п. 6.1.3 настоящего стандарта определить параметры эмпирических распределений для каждой сравниваемой партии;

по п. 6.1.4 настоящего стандарта выявить грубые ошибки при испытании отдельных образцов;

по п. 6.1.5 настоящего стандарта проверить соответствие распределения, если имеется сомнение в правильности выбора закона распределения.

2. Порядок проверки однородности дисперсий и равенства средних в сравниваемых партиях приведен в табл. 1 и 2.

3. При проведении статистического анализа уровни значимости принимают равными $\alpha=0,05$ или $\alpha=0,10$, уровни доверительной вероятности принимают равными $\beta=0,95$ или $\beta=0,90$.

Таблица 1

Гипотеза	Критерий проверки гипотезы	Число степеней свободы	Гипотеза принимается, если удовлетворяется неравенство	Примечание
$\sigma_1^2=\sigma_2^2$	$F=(S^2_{\lg N})_1/(S^2_{\lg N})_2$; $(S^2_{\lg N})_1>(S^2_{\lg N})_2$; $(S^2_{\lg N})_1$ и $(S^2_{\lg N})_2$—см п. 6.1.3 настоящего стандарта	$K_1=n_1-1$ $K_2=n_2-1$	$F<F_\alpha$ F_α —табл. 9 приложения 3; α—уровень значимости	Критерий Фишера применим при неодинаковом числе образцов (n_1 и n_2) в сравниваемых партиях
$\sigma_1^2=\sigma_2^2=\ldots\sigma_m^2$	$G=\dfrac{(S^2_{\lg N})_{\max}}{\sum\limits_{l=1}^{m}(S^2_{\lg N})_l}$ $(S^2_{\lg N})_{\max}$—наибольшая дисперсия	$K_1=n-1$ $K_2=m$, m—число сравниваемых дисперсий	$G<G_\alpha$ G_α —табл. 10 приложения 3	Критерий Кохрена применим при одинаковом числе образцов (n) в сравниваемых партиях
$\sigma_1^2=\sigma_2^2=\ldots\sigma_m^2$	$\chi^2=\dfrac{2{,}3026}{\eta}\left[\lg S^2\left(\sum\limits_{l=1}^{m}n_l-m\right)-\sum\limits_{l=1}^{m}(n_l-1)\cdot\lg(S^2_{\lg N})_l\right]$; $\eta=1+\dfrac{1}{3(m-1)}\left(\sum\limits_{l=1}^{m}\dfrac{1}{n_l-1}-\dfrac{1}{\sum\limits_{l=1}^{m}n_l-m}\right)$; $S^2=\dfrac{\sum\limits_{l=1}^{m}(n_l-1)(S^2_{\lg N})_l}{\sum\limits_{l=1}^{m}n_l-m}$.	$K=m-1$ n_l – число образцов в l-й партии	$\chi^2<\chi^2_\alpha$ χ^2_α—табл. 11 приложения 3	Критерий Бартлета применим при неодинаковом числе образцов в сравниваемых партиях

Таблица 2

Гипотеза	Критерий проверки гипотезы	Число степеней свободы	Гипотеза принимается, если удовлетворяется неравенство	Примечание
$a_1=a_2$	$t=\frac{\lvert\overline{\lg N_1}-\overline{\lg N_2}\rvert}{S\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}}$; $S=\sqrt{\frac{(n_1-1)(S^2_{\lg N})_1+(n_2-1)(S^2_{\lg N})_2}{n_1+n_2-2}}$	$K=n_1+n_2-2$	$t<t_{\beta k}$ $t_{\beta k}$—табл. 7 приложения 3; β—уровень доверительной вероятности	Критерий применим при $\sigma_1^2=\sigma_2^2$
$a_1=a_2$	$t=\frac{\lvert\overline{\lg N_1}-\overline{\lg N_2}\rvert}{\sqrt{\frac{(S^2_{\lg N})_1}{n_1}+\frac{(S^2_{\lg N})_2}{n_2}}}$	$K=\frac{(n_1-1)\times}{(n_1-1)(1-g)^2+\times(n_2-1)+(n_2-1)g}$; $g=\frac{(S^2_{\lg N})_1\cdot n_2}{(S^2_{\lg N})_1 n_2+(S^2_{\lg N})_2 n_1}$	$t<t_{\beta k}$	Критерий применим при $\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 3
2. Испытательное оборудование 14
3. Условия испытаний 15
4. Методы отбора образцов 19
5. Проведение испытаний и обработка результатов 20
6. Статистическая оценка результатов испытаний 22

Приложение 1 (обязательное). Термины, определения и обозначения . 28

Приложение 2 (рекомендуемое). Формулы для вычисления полуосей площадки контакта и максимального нормального напряжения . . . 30

Приложение 3 (справочное). Таблицы 34

Приложение 4 (рекомендуемое). Пример расчета напряжений $\sigma_{z\max}$ с учетом формоизменений, вызванных пластическими деформациями . 52

Приложение 5 (рекомендуемое). Методика определения механических характеристик сталей и сплавов при сжатии 57

Приложение 6 (рекомендуемое). Пример расчета напряженного состояния в зоне контакта и аналитического описания левой ветви кривой контактной усталости для схемы качения с внешней касательной нагрузкой 63

Приложение 7 (рекомендуемое). Описание испытательной машины типа МКВ-КМ 70

Приложение 8 (рекомендуемое). Электронный автоматический выключатель к машинам для испытания на контактную усталость 72

Приложение 9 (рекомендуемое). Примеры рабочих чертежей образцов для испытаний на контактную усталость 75

Приложение 10 (рекомендуемое). Протокол испытаний образца на контактную усталость (приложение к сводному протоколу) 82

Приложение 11 (рекомендуемое). Сводный протокол 83

Приложение 12 (рекомендуемое). Аналитическое описание левой ветви кривой контактной усталости методом регрессионного анализа . 85

Приложение 13 (рекомендуемое). Проведение испытаний методом ступенчатого изменения напряжений 88

Приложение 14 (рекомендуемое). Пример оценки параметров функции распределения контактно-усталостного ресурса на заданном уровне напряжения 90

Приложение 15 (рекомендуемое). Статистический анализ результатов сравнительных испытаний 93

Редактор *И. В. Виноградская*
Технический редактор *В. Ю. Смирнова*
Корректор *В. С. Черная*

Сдано в набор 16.01.79 Подп. в печ. 20.04.79 6,0 п. л. 4,69 уч. -изд. л. Тир. 25000 Цена 25 коп.

gost.e-ecolog.ru

...счета» Издательство стандартов, Москва, Д-557, Новопресненский пер., 3
Калужская типография стандартов, ул. Московская 256. Зак. 176