РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

КРАНЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫЕ
РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ
БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ

РТМ 24.090.25-76

Издание официальное

gost.e-ecolog.ru

РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН Всесоюзным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом подъемно-транспортного машиностроения, погрузочно-разгрузочного и складского оборудования и контейнеров (ВНИИПТмаш)

Директор ВНИИПТмаш А. Х. Комашенко
Заведующий отделом стандартизации А. С. Оболенский
Руководитель темы И. О. Спицына
Руководитель и исполнитель В. *И. Брауде* (*Ленинградский институт водного транспорта*)
Исполнитель Е. Н. Андрианов (Ленинградский институт водного транспорта)

ПОДГОТОВЛЕН К УТВЕРЖДЕНИЮ Главным управлением подъемно-транспортного машиностроения

Главный инженер В. К. Пирогов

УТВЕРЖДЕН Министерством тяжелого и транспортного машиностроения

ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Распоряжением Министерства тяжелого и транспортного машиностроения от 9 февраля 1976 г. № ГС-002/1086.

©Научно-исследовательский институт информации по тяжелому и транспортному машиностроению, 1978.

УДК 621.873.2 Группа Г86

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

КРАНЫ ГРУЗОПОДЪЕМНЫЕ. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ

РТМ 24.090.25-76

Вводится впервые

Распоряжением Министерства тяжелого и транспортного машиностроения от 9 февраля 1976 г. № ГС 002/1086 данный руководящий технический материал утвержден в качестве рекомендуемого.

Настоящий РТМ распространяется на механизмы и металлоконструкции кранов и содержит описание методов расчета вероятности безотказной работы отдельных элементов и их групп.

Вероятность безотказной работы определяется по условию непревышения нагрузкой (напряжением) опасного уровня и по условию сохранения циклической прочности. Расчет выполняется на основе полученных в результате натурных тензометрических испытаний или статистического моделирования данных о представительных реализациях или статистических распределениях действующих нагрузок (напряжений), а также необходимых данных о законах распределения опасного уровня нагрузок (напряжений). Статистические характеристики действующих нагрузок (напряжений) могут быть определены аналитически.

Расчетная вероятность безотказной работы сопоставляется с нормативной. Время, в течение которого должна обеспечиваться вероятность безотказной работы, устанавливается на основе минимизации средней суммы приведенных годовых затрат или по данным эксплуатации лучших образцов кранов.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА

1.1. Эксплуатационные нагрузки (напряжения) и опасный уровень нагрузок (напряжений) элементов кранов представляют собой случайные процессы или случайные величины, поэтому показатели надежности элементов имеют вероятностный характер.

Издание официальное № 74045311 Перепечатка воспрещена

1.2. Элементы кранов в зависимости от степени ответственности делятся на две группы. К первой группе относятся элементы, отказ которых имеет аварийные последствия. В качестве их показателя надежности принимается вероятность безотказной работы $p(t)$ за расчетное время t_p. Остальные элементы образуют вторую группу. Их отказ приводит к экономическим потерям, и в качестве показателя надежности этих элементов принимается средний ресурс.

1.3. Для элементов первой группы должно выполняться условие:

$$p(t=t_p) \geq [p], \qquad (1)$$

где t – текущее время;

$[p]$ – нормированное значение вероятности безотказной работы, которое устанавливается путем анализа надежности элементов лучших образцов кранов и сопоставления с нормированными показателями надежности элементов машин других типов.

При отсутствии этих данных рекомендуется принимать для кранов общего назначения:

$$[p] \geq 0{,}99. \qquad (2)$$

1.4. Отказ системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, происходит при отказе любого из них.

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из к последовательно соединенных элементов определяется по формуле

$$p(t) = \prod_{j=1}^{K} p_j(t), \qquad (3)$$

где $p_j(t)$ – вероятность безотказной работы элемента j.

Отказ системы, состоящей из параллельно соединенных элементов, происходит в случае отказа всех элементов. При параллельном соединении n элементов и неизменной вероятности безотказной работы оставшихся элементов (после отказа части из них), общая вероятность безотказной работы системы определяется по зависимости

$$p(t) = 1 - \prod_{j=1}^{n} [1 - p_j(t)], \qquad (4)$$

где p_j – вероятность безотказной работы элемента j.

1.5. Вероятность безотказной работы j -того элемента, отказ которого может возникнуть из-за превышения нагрузкой (напряжением) опасного уровня или накопления усталостных повреждений определяется по формуле

$$p_j(t) = p_н(t)\, p_ц(t), \qquad (5)$$

где $p_н(t)$ – вероятность безотказной работы по условию непревышения нагрузкой (напряжением) опасного уровня;

$p_ц(t)$ – вероятность безотказной работы по условию сохранения циклической прочности.

1.6. Расчетное определение вероятности безотказной работы ограничивается областью

$$p(t) \leq 0{,}9999. \qquad (6)$$

1.7. Расчет вероятности безотказной работы элементов и систем выполняется на стадии технического проектирования.

В случае отсутствия статистических данных по нагрузкам и напряжениям допускается расчетное определение вероятности безотказной работы по результатам натурных испытаний опытных образцов кранов и их элементов.

2. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВ $p_н(t)$ ПО УСЛОВИЮ НЕПРЕВЫШЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ (НАПРЯЖЕНИЕМ) ОПАСНОГО УРОВНЯ

2.1. Отказ из-за превышения нагрузкой (напряжением) опасного уровня может возникнуть в связи с разрушением, недопустимо большой упругой или пластической деформацией элемента.

2.2. Для определения вероятности безотказной работы необходимы вероятностные характеристики процессов нагружения (изменения напряжений) и величины опасного уровня нагрузки (напряжения).

Возможны два расчетных случая:

А – действующая нагрузка (напряжение) – случайный процесс $S(t)$ (черт. 1); опасный уровень нагрузки (напряжения) – случайная величина S_o (черт. 2);

Б – действующие нагрузки (напряжения) – совокупность независимых случайных величин S (черт. 3); опасный уровень нагрузки (напряжения) – случайная величина S_o.

Действующая нагрузка – случайный процесс

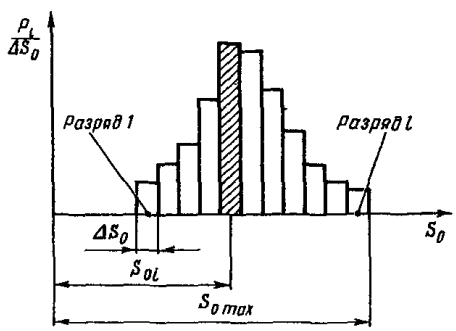
Реализация процесса



Черт. 1

Опасный уровень нагрузки – случайная величина

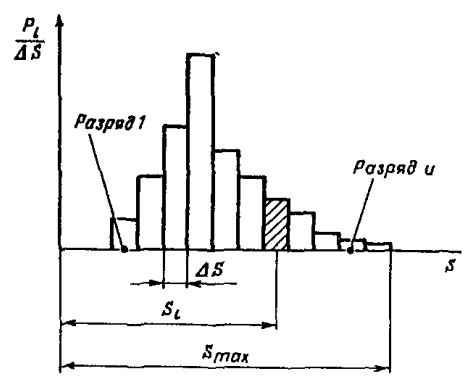
Гистограмма опасных нагрузок



Черт. 2

Действующие нагрузки – случайные величины

Гистограмма действующих нагрузок



Черт. 3

Случай А характерен для большинства элементов механизмов и металлоконструкций кранов, нагрузки и напряжения $/S(t)/$, в которых меняются в процессе работы непрерывно. Случайный характер изменения $S(t)$ предопределяется случайностью таких факторов, как уровень и частота динамических нагрузок, скорость и направление ветра, значения коэффициентов трения и т.п.

Случай Б имеет место тогда, когда нагрузки могут рассматриваться как совокупность независимых случайных величин. Например, нагрузки от сил тяжести поднимаемых грузов случайной массы, пиковые, независящие друг от друга нагрузки, возникающие при соударениях в зазорах или в результате наложения упругих колебаний и т.п.

2.3. Расчет вероятности безотказной работы в случае А, при условии, что действующая нагрузка является стационарным случайным процессом с распределением ординат по усеченному нормальному закону, а опасный уровень – случайная величина, также распределенная по усеченному нормальному закону, выполняется по формуле

$$p_H(t) = 1 - \frac{C_0 \sigma_S t_p \bar{n}}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_0^2}} \exp\left[-\frac{(\langle S_0 \rangle - \langle S \rangle)}{2(\sigma_S^2 + \sigma_0^2)}\right]^2, \qquad (7)$$

где $\bar{n}$ – среднее число пересечений в единицу времени уровня процессом $S(t)$;

t_p – расчетное время работы элемента;

$$C_0 = C_1 \cdot C_2, \qquad (8)$$

$$C_1 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{S_{max} - \langle S \rangle}{\sigma_S \sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{S_{min} - \langle S \rangle}{\sigma_S \sqrt{2}}\right)\right]}, \qquad (9)$$

$$C_2 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{S_{0max} - \langle S_0 \rangle}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{S_{0min} - \langle S_0 \rangle}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right)\right]}, \qquad (10)$$

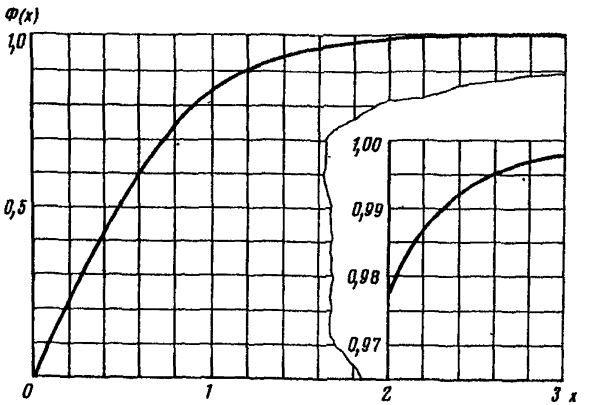
где Φ – табулированная функция Лапласа (см. таблицу и черт. 4);

S_{max}, S_{min} – максимальное и минимальное значения нагрузки (напряжения);

S_{0max}, S_{0min} – максимальное и минимальное значения опасного уровня нагрузки (напряжения);

σ_S, σ_0 – средние квадратические отклонения нагрузки (напряжения) и ее опасного уровня;

График функции Лапласа



Черт. 4

$\langle S\rangle, \langle S_0\rangle$ – математические ожидания нагрузки (напряжения) и ее опасного уровня.

Если нормальные распределения имеют неусеченный характер, то $C_0 = 1$.

В том случае, когда $S_{max} \geq \langle S\rangle + 2\sigma_S$ и $S_{min} \leq \langle S\rangle - 2\sigma_S$, можно полагать $C_1 = 1$. Если $S_{0max} \geq \langle S_0\rangle + 2\sigma_0$ и $S_{0min} \leq \langle S_0\rangle - 2\sigma_0$, то можно полагать $C_2 = 1$.

Пример расчета приведен в приложении справочном.

2.4. При условиях, оговоренных в пункте 2.3. нормированная вероятность безотказной работы в течение расчетного времени t_p будет обеспечена, если

$$S_{max} \leq \frac{S_{0min}}{n_1}, \qquad (11)$$

где S_{max} – максимальное расчетное напряжение, кгс/см^2,

$$S_{max} = \langle S\rangle (1 + \kappa\varphi); \qquad (12)$$

S_{0min} – минимальное расчетное опасное напряжение, кгс/см^2,

$$S_{0min} = \langle S_0\rangle (1 - t\nu); \qquad (13)$$

Значения функции Лапласа $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1,00	0,8427		
1,05	0,8624	1,95	0,9942
1,10	0,8802	2,00	0,9953
1,15	0,8961	2,05	0,9963
1,20	0,9103	2,10	0,9970
1,25	0,9229	2,15	0,9976
1,30	0,9340	2,20	0,9981
1,35	0,9438	2,25	0,9985
1,40	0,9523	2,30	0,9988
1,45	0,9597	2,35	0,9991
1,50	0,9661	2,40	0,9993
1,55	0,9716	2,45	0,9995
1,60	0,9766	2,50	0,9996
1,65	0,9804	2,55	0,9997
1,70	0,9838	2,60	0,9998
1,75	0,9867	2,65	0,9998
1,80	0,9891	2,70	0,9999
1,85	0,9911	2,75	0,9999
1,90	0,9928	2,80	0,9999
		3,00	1,0000

n_1 – коэффициент запаса прочности;

$$n_1 = \frac{(1-l\nu)(\varphi + \psi\gamma\sqrt{\varphi^2+1})}{\varphi(1+\kappa\psi)} . \qquad (14)$$

В этих зависимостях обозначены: $\varphi = \frac{\sigma_S}{\sigma_0}$;

$\psi = \frac{\sigma_S}{\langle S \rangle}$ – коэффициент вариации напряжений $S(t)$;

к – количество средних квадратических отклонений между средним $\langle S \rangle$ и максимальным расчетным напряжением S_{max} ;

$\nu = \frac{\sigma_0}{\langle S_0 \rangle}$ – коэффициент вариации опасного напряжения S_0 ;

l – количество средних квадратических отклонений между средним $\langle S_0 \rangle$ и минимальным опасным напряжением S_{0min} ;

γ – характеристика безопасности

$$\gamma = \sqrt{-2\ln\left(-\frac{l\,n[p]\sqrt{1+\varphi^2}}{\varphi\bar{n}\,t_p}\right)} . \qquad (15)$$

Пример расчета приведен в приложении.

2.5. Выбор геометрической характеристики F (площадь, момент сопротивления и т.п.) сечения элемента, при условиях, оговоренных в пункте 2.3, выполняется по формуле

$$F = \frac{S_{H.max} \cdot n_1}{S_{0,min}}, \qquad (16)$$

где $S_{H.max}$ – расчетное значение максимальной нагрузки, кгс.

$$S_{H.max} = \langle S_H \rangle (1 + \kappa_H \psi_H); \qquad (17)$$

$\langle S_H \rangle$ – среднее значение нагрузки, кгс;

$\psi_H = \frac{\sigma_{SH}}{\langle S_H \rangle}$ – коэффициент вариации нагрузки;

κ_H – количество средних квадратических отклонений между средней $\langle S_H \rangle$ и расчетной максимальной $S_{H.max}$ нагрузкой.

Минимальное расчетное опасное напряжение $S_{0,min}$ вычисляется по формуле (13), а коэффициент запаса прочности n_1 по формуле (14), в которой все значения $\langle S \rangle$ и σ_S заменяются соответственно на $\langle S_H \rangle$ и σ_{SH}.

Пример расчета приведен в приложении.

2.6. Расчет вероятности безотказной работы в случае А при условии, что имеется представительная реализация $S(t)$ действующих нагрузок (напряжений) и гистограмма (см. черт. 1, 2) их опасного уровня, осуществляется по формуле

$$p_H(t) = 1 - n^* t_p, \qquad (18)$$

где $n^* = \sum_{i=1}^{l} p_i n_i$ – среднее число выбросов за опасный уровень в единицу времени;

p_i – частота попадания случайного значения опасного уровня в i-тый разряд гистограммы;

l – общее количество разрядов в гистограмме S_0;

t_p – расчетное время работы элемента;

n_i – среднее число выбросов в единицу времени за опасный уровень i;

$$n_i = n_H \exp\{-\gamma[(R_{0i}-1)^2 - (R_H-1)^2]\}, \qquad (19)$$

где $n_н$ – среднее число выбросов в единицу времени за относительный уровень $R_н = \frac{0{,}85 S_{max}}{\langle S \rangle}$;

S_{max} – максимальная нагрузка в реализации;

$\langle S \rangle$ – среднее значение нагрузок в реализации (при определении $\langle S \rangle$ нулевые участки не учитываются, нагрузки берутся по модулю);

$R_{0i} = \frac{S_{0i}}{\langle S \rangle}$ – относительный уровень, соответствующий среднему значению i-того разряда опасного уровня S_{0i};

$$\gamma = \frac{\ln n_н - \ln n_к}{[(R_к - 1)^2 - (R_н - 1)^2]}; \qquad (20)$$

$n_к$ – среднее число выбросов в единицу времени за относительный уровень $R_к = \frac{0{,}97 S_{max}}{\langle S \rangle}$

Пример расчета приведен в приложении.

2.7. Расчет вероятности безотказной работы $p_н(t)$ в случае Б при условии, что действующие нагрузки (напряжения) и их опасные уровни распределяются по усеченным нормальным законам, выполняется по формуле

$$p_н(t) = \left\{ \frac{C_0'}{2} \varphi \left[\frac{(S_{0.max} - S_{min}) - (\langle S_0 \rangle - \langle S \rangle)}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_S^2}} \right] + \frac{C_0'}{2} \varphi \left[\frac{\langle S_0 \rangle - \langle S \rangle}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_S^2}} \right] \right\}^{n t_p}, \qquad (21)$$

где n – количество нагружений в единицу времени;

t_p – расчетное время работы элемента

$$C_0' = \frac{1}{\frac{1}{2}\left\{ \varphi \left[\frac{(S_{0.max} - S_{min}) - (\langle S_0 \rangle - \langle S \rangle)}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_S^2}} \right] - \varphi \left[\frac{(S_{0.min} - S_{max}) - (\langle S_0 \rangle - \langle S \rangle)}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_S^2}} \right] \right\}}. \qquad (22)$$

Формулу (21) рекомендуется использовать для инженерных расчетов, основанных на использовании обычных таблиц функции $\Phi(x)$ – в том случае, когда общее количество нагружений за время работы – $n t_p$ находится в пределах от 1 до 200. При больших $n t_p$ предпочтительно использовать представление о нагрузке, как случайном процессе.

Пример расчета приведен в приложении.

2.8. При условиях, оговоренных в пунктах 2.7., и когда $C_0' \approx 1{,}0$, нормированная вероятность безотказной работы в течение времени t_p будет обеспечена, если выполняется неравенство (11).

В формуле запаса прочности (14) характеристика безопасности γ заменяется величиной

$$\gamma_1 = x\sqrt{2}\,, \tag{23}$$

где x определяется с помощью таблицы или черт. 4 по расчетному значению

$$\Phi(x) = 2^{\sqrt[nt_p]{[p]}} - 1\,. \tag{24}$$

Пример расчета приведен в приложении.

2.9. Выбор геометрической характеристики F (площадь, момент сопротивления и т.п.) сечения элемента, при условиях, оговоренных в пункте 2.7., и когда $C_0' \approx 1$, выполняется по формуле (16).

При вычислении запаса прочности γ заменяется на γ_1 в соответствии с пунктом 2.8.

Пример расчета приведен в приложении.

3. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КРАНОВ $p_ц(t)$ ПО УСЛОВИЮ СОХРАНЕНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

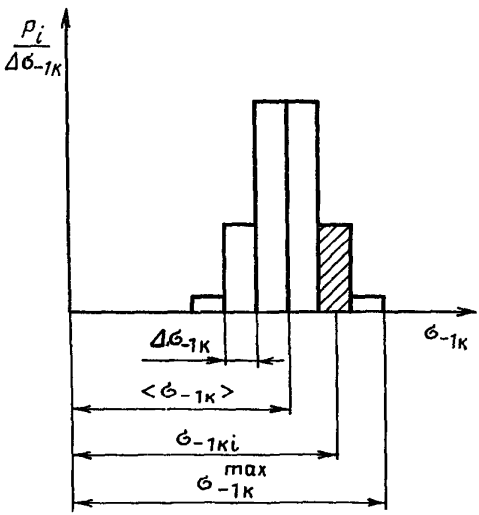
3.1. Отказ из-за потери циклической прочности возникает в связи с накоплением усталостных повреждений и образованием макроскопической трещины в элементе.

3.2. Для определения вероятности безотказной работы требуются вероятностные характеристики амплитуд действующих напряжений, приведенных к симметричному циклу, и неограниченного предела выносливости элемента.

3.3. Расчет вероятности безотказной работы в случае усеченного нормального закона распределения неограниченного предела выносливости σ_{-1K} выполняется по формуле

$$p_ц(t) = \frac{C_3}{2}\left[\Phi\left(\frac{\sigma_{-1K}^{max} - \langle\sigma_{-1K}\rangle}{\sqrt{2}\,\sigma_{\sigma_{-1K}}}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma_{-1K}^{*} - \langle\sigma_{-1K}\rangle}{\sqrt{2}\,\sigma_{\sigma_{-1K}}}\right)\right], \tag{25}$$

Предел выносливости – случайная величина.
Гистограмма пределов выносливости



Черт. 5

где $<\sigma_{-1к}>, \sigma_{\sigma_{-1к}}, \sigma^{max}_{-1к}$ кгс/см^2 – математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и максимальное значение неограниченного предела выносливости элемента (черт. 5);

C_3 – определяется по формуле, аналогичной (10) при условии замены характеристик величины S_o характеристиками величины $\sigma_{-1к}$;

$\sigma^*_{-1к}$ – пороговое значение неограниченного предела выносливости, кгс/см^2 (см. следующие пункты);

Φ – табулированная функция Лапласа (см. черт. 4, таблицу).

3.4. Пороговое значение неограниченного предела выносливости $\sigma^*_{-1к}$, при известной гистограмме действующих напряжений (аналогичной приведенной на черт. 3 при условии замены S на $\sigma_{пр}$), приведенных к симметричному циклу определяется по формуле

$$\sigma^{*}_{-1к} = \frac{1}{\sqrt[m]{a}} \sqrt[m]{\frac{N}{N_0} \sum_{\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} \sigma^{m}_{пр\,i}\, p_i} \qquad \text{кгс/см}^2, \qquad (26)$$

где N_0 – базовое число циклов;

m – показатель кривой усталостной прочности;

N – количество циклов изменения напряжений за расчетный срок службы элемента;

$$a = \frac{\left(\sum_{0{,}5\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} \sigma_{пр.i}\, p_i\right) : \left(\sum_{0{,}5\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} p_i\right) - 0{,}5\sigma^{*}_{-1к}}{\sigma^{max}_{пр} - 0{,}5\sigma^{*}_{-1к}}, \qquad (27)$$

сумма относительных повреждений, которая при $a < 0{,}2$ принимается равной 0,2; если все амплитуды $\sigma_{пр.i}$ превышают значение $\sigma^{*}_{-1к}$ и нет значительных кратковременных перегрузок ($\sigma_{пр.max} \leq (1{,}5-2)\,\sigma^{*}_{-1к}$), то следует принимать a = 1.

$\sigma_{пр\,i}$, p_i – напряжение, кгс/см^2 (середина разряда) и частность i-того разряда гистограммы приведенных напряжений (см. черт. 3).

Если $\sigma^{*}_{-1к} \leq \sigma^{min}_{-1к}$, то $p_ц(t) = 1$, если $\sigma^{*}_{-1к} > \sigma^{max}_{-1к}$, то $p_ц(t) = 0$.

Распределение приведенных напряжений $\sigma_{пр}$ может быть заменено распределением амплитуд – σ_a кгс/см^2. В этом случае $\sigma^{*}_{-1к}$ определяется по формуле

$$\sigma_{-1к} \approx \frac{A}{\sqrt[m]{a}} \sqrt[m]{\frac{N}{N_0} \sum_{\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{a}} \sigma^{m}_{a} \cdot p_i} \qquad \text{кгс/см}^2, \qquad (28)$$

где $A = \dfrac{(1-\frac{n}{K}) - (r)(1+\frac{n}{K})}{(1-\langle r \rangle)}$; (29)

n – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла;

K – эффективный коэффициент концентрации;

$\langle r \rangle$ – средний коэффициент асимметрии.

Уравнения (26), (28) решаются графически или методом последовательных приближений, однако, при выполнении расчетов с

точностью до 10% можно полагать в правых частях формул (26), (27), (28)

$$\sigma^{*}_{-1к} \approx \langle \sigma_{-1к} \rangle .$$

При этом сопоставляются значения $\sigma^{*}_{-1к}$, вычисленные по формуле (26) и принятые в первом приближении по формуле (28), в результате чего принимается решение о необходимости уточненного вычисления порогового значения неограниченного предела выносливости.

Пример расчета приведен в приложении.

3.5. Расчет порогового значения неограниченного предела выносливости $\sigma^{*}_{-1к}$ в том случае, когда распределение амплитуд представлено в виде суммы n нормальных усеченных законов выполняется по формуле

$$\sigma^{*}_{-1к} = \langle \sigma_{-1к} \rangle \frac{A}{\sqrt[m]{a}} \cdot \sqrt[m]{\frac{N}{N_0}} \sqrt[m]{\sum_{j=1}^{n} \kappa_j p_j q_j^m} , \qquad (30)$$

где $$a = \frac{\left(\sum_{j=1}^{n} p_j \beta_j\right) : \left(\sum_{j=1}^{n} p_j c_j\right) - 0{,}5}{x_j^{max} - 0{,}5} ; \qquad (31)$$

или при условиях, оговоренных в пункте 3.4, принимается $a = 1$;

p_j – вероятность появления усеченного нормального закона j в общем суммарном распределении амплитуд;

q_j – находится по черт. 6 в зависимости от $\langle x_j \rangle$ и $x_{\sigma j}$;

$\langle x_j \rangle$ – относительное значение математического ожидания распределения амплитуд j-того закона;

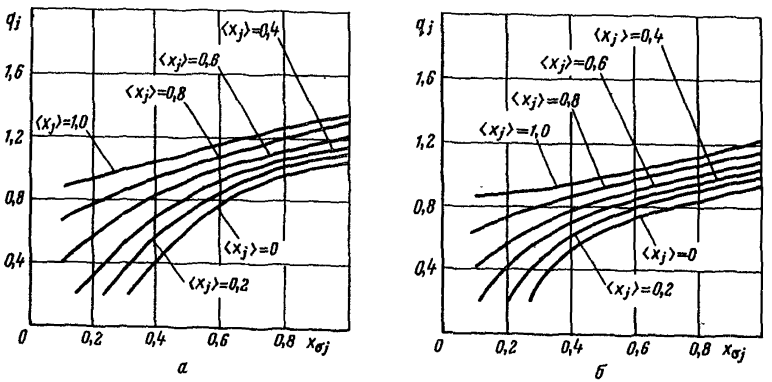
$x_{\sigma j}$ – относительное значение среднего квадратического отклонения j-того закона.

$$\langle x_j \rangle = \frac{\langle \sigma_j \rangle}{\langle \sigma_{-1к} \rangle} ; \quad x_{\sigma j} = \frac{\sigma_{\sigma j}}{\langle \sigma_{-1к} \rangle} ;$$

$\langle \sigma_j \rangle$ – математическое ожидание j-того закона распределения амплитуд;

$\sigma_{\sigma j}$ – среднее квадратическое отклонение j-того закона распределения амплитуд.

Значение коэффициента q_j в зависимости от $\langle x_j \rangle$ и $x_{\sigma j}$.



а – при $m = 6$; б – при $m = 9$

Черт. 6

$$x_{jmax} = \frac{\langle \sigma_j \rangle + 4\sigma_{\sigma j}}{\langle \sigma - 1_K \rangle} ; \tag{32}$$

$$x_{jmin} = \frac{\langle \sigma_j \rangle - 4\sigma_{\sigma j}}{\langle \sigma - 1_K \rangle} ; \tag{33}$$

$$\kappa_j = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{x_{jmax} - \langle x_j \rangle}{x_{\sigma j}\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{x_{jmin} - \langle x_j \rangle}{x_{\sigma j}\sqrt{2}}\right)\right]} ; \tag{34}$$

$$b_j = \kappa_j \{x_{\sigma i}[f_{1j} - f_{2j}] - \langle x_j \rangle [f_{3j} - f_{4j}]\} ; \tag{35}$$

$$c_j = \kappa_j (f_{3j} - f_{4j}) ; \tag{36}$$

$f_{1,2,3,4j}$ – определяются по графикам (черт. 7) в зависимости от h_j^{max} и h_j

$$h_j^{max} = \frac{x_j^{max} - \langle x_j \rangle}{x_{\sigma j}}; \qquad (37)$$

$$h_j = \frac{0,5 - \langle x_j \rangle}{x_{\sigma j}}; \qquad (38)$$

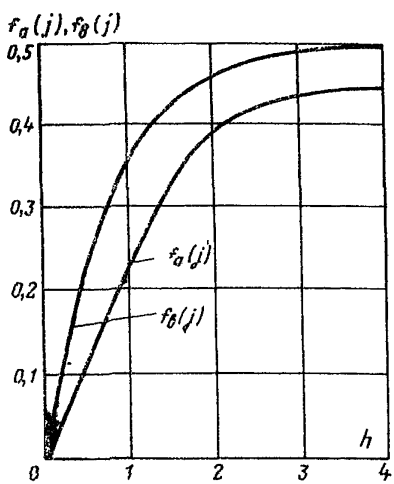
$$f_{1j} = f_\alpha(h_j^{max}); f_{2j} = f_\alpha(h_j); f_{3j} = f_\beta(h_j^{max}); f_{4j} = f_\beta(h_j).$$

Пример расчета приведен в приложении.

3.6. При условиях, оговоренных в пункте 3.3., нормированная вероятность безотказной работы $[p]$ за период, соответствующий N нагружениям, будет обеспечена, если

$$\sigma_{-1K}^{*} \leq \frac{\langle \sigma_{-1K} \rangle}{n_2} \quad \text{кгс/см}^2, \qquad (39)$$

Расчетные коэффициенты



Черт. 7

где $\sigma^*_{-1к}$ определяется в соответствии с пунктами 3.4. или 3.5.

Коэффициент запаса циклической прочности

$$n_2 = \frac{1}{1-\sqrt{2}\,x\rho}, \qquad (40)$$

где x определяется с помощью таблицы или черт. 4 по расчетному значению

$$\Phi(x) = \frac{2}{C_3}\,[p] - 0{,}9972; \qquad (41)$$

$\rho = \frac{\sigma_{\sigma_к}}{\langle\sigma_{-1к}\rangle}$ – коэффициент вариации предела выносливости элемента в расчетном сечении.

Пример расчета приведен в приложении.

3.7. Выбор геометрической характеристики F (площадь, момент сопротивления и т.п.) сечения элемента, при условиях, оговоренных в пункте 3.3, выполняется по формуле

$$F \geq \frac{S^*_{пр} \cdot n_2}{\langle\sigma_{-1к}\rangle}, \qquad (42)$$

где пороговое значение нагрузки $S^*_{пр}$ определяется по формулам (26), или (28), или (30), при условии замены $\sigma_{пр}$ на $S_{пр}$. Коэффициент запаса циклической прочности находится по формуле (40).

Пример расчета приведен в приложении.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КРАНА

4.1. Экспериментальные значения статистических характеристик действующих нагрузок (напряжений), $\langle S\rangle$, σ_S, $\vec{n}$, S_{max}, S_{min}, $n_н$, $n_к$ и распределения приведенных напряжений определяются по результатам испытаний кранов аналогичной конструкции или опытного образца проектируемой машины. Обработка статистической информации о нагруженности элементов должна проводиться в соответствии с РТМ 24.090.07-75.

4.2. Все характеристики действующих нагрузок (напряжений) могут быть определены на стадии проектирования с помощью ЭВМ методом статистического моделирования.

4.3. Аналитическое определение $\langle S\rangle$, σ_S, n и характе-

ристик распределений приведенных напряжений выполняется в процессе проектирования методами статистической динамики машин циклического действия.

4.4. Характеристики опасного уровня нагрузок (напряжений) $<S_0>$, σ_0 и циклической прочности элементов $<\sigma_{-1}>$, $<\tau_{-1}>$, ρ, m, N_0, $k_\sigma(d)$, $k_\tau(d)$ определяются на основе испытаний образцов материала (деталей) и содержатся в справочной литературе.

4.5. Расчетное время t_p задается на основе обобщения опыта эксплуатации лучших образцов кранов. Возможно определение t_p, исходя из минимизации годовых приведенных эксплуатационных и капитальных затрат.

ПРИЛОЖЕНИЕ
Справочное

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Расчет вероятности безотказной работы оси механизма подъема по условию непревышения нагрузкой опасного уровня (случай А п.2.3.).

Исходные данные:

$d_{и}^{в} = 15{,}0$ см – диаметр оси в опасном сечении;

$W_{и} = 335$ см^3 – момент сопротивления сечения;

материал – сталь 34ХН3М (НВ = 270);

$< \sigma_{т} > = 6{,}7 \cdot 10^3$ кгс/см^2 – математическое ожидание предела текучести;

$< S_{0} > = < \sigma_{т} > W_{и} = 6{,}7 \cdot 10^3 \cdot 335 = 22{,}5 \cdot 10^5$ кгс·см – математическое ожидание опасного уровня нагружения;

$\nu = 0{,}06$ – коэффициент вариации опасного уровня нагружения материала;

$\sigma_{0} = \nu < S_{0} > = 0{,}06 \cdot 22{,}5 = 1{,}3 \cdot 10^5$ кгс·см – среднее квадратическое отклонение опасного уровня;

$S_{max} = 9 \cdot 10^5$ кгс·см; $S_{min} = 0$; $< S > = 3 \cdot 10^5$ кгс·см; $\sigma_{S} = 2{,}2 \cdot 10^5$ кгс·см; $\bar{n} = 11$ 1/с – характеристики процесса нагружения в опасном сечении вала;

$t_{р} = 2 \cdot 10^8$ с – расчетное время работы вала за 20-летний период эксплуатации крана;

$$C_1 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{9 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5}{\sqrt{2} \cdot 2{,}2 \cdot 10^5}\right) - \Phi\left(\frac{0 - 3 \cdot 10^5}{\sqrt{2} \cdot 2{,}2 \cdot 10^5}\right)\right]} = 1{,}097;$$

$C_2 \approx 1;$

$C_0^2 = C_1 \cdot C_2 = 1{,}097.$

Решение:

Исходные данные подставляются в формулу (7) для определения значения $p_{н}(t)$ – вероятности безотказной работы по условию непревышения нагрузкой опасного уровня*

$$p_{н}(t) = 1 - \frac{C_0 \sigma_S t_р \bar{n}}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_S^2}} \exp\left[-\frac{(< S_0 > - < S >)^2}{2(\sigma_0^2 + \sigma_S^2)}\right] =$$

---

* Здесь и далее вероятность неразрушения определяется с точностью до четырех знаков.

$$= 1 - \frac{1{,}097 \cdot 2{,}2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^8 \cdot 11}{\sqrt{2{,}2^2 + 1{,}3^2} \cdot 10^5} \exp\left\{-\frac{(22{,}5 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5)^2}{2[(2{,}2 \cdot 10^5)^2 + (1{,}3 \cdot 10^5)^2]}\right\} =$$

$$= 1 - 2{,}04 \cdot 10^9 \exp(-29) = 1 - 5{,}08 \cdot 10^{-4} \approx 0{,}9995.$$

Пример 2. Расчет прочности оси барабана механизма подъема по заданной нормированной величине безотказной работы, когда нагрузка является случайным процессом (случай А п.2.4).

Исходные данные:

Материал оси – сталь 34ХН3М;

$\langle S \rangle = 0{,}45 \cdot 10^3$ кгс/см^2 – математическое ожидание процесса действующих напряжений;

$\varphi = 0{,}75$ – коэффициент вариации процесса напряжений;

$k = 3$ – количество средних квадратических отклонений между $\langle S \rangle$ и S_{max};

$\langle S_0 \rangle = 7{,}6 \cdot 10^3$ кгс/см^2 – математическое ожидание опасного уровня напряжений;

$\nu = 0{,}06$ – коэффициент вариации опасного уровня напряжений;

$l = 2$ – количество средних квадратических отклонений между $\langle S_0 \rangle$ и $S_{0\,min}$;

$\varphi_0 = 0{,}75$; $\bar{n} = 5 \cdot 10^{-2}$ 1/с; $t_p = 2 \cdot 10^8$ с; $[p] = 0{,}99$.

Решение:

1. По формуле (12) определяется максимальное расчетное напряжение

$$S_{max} = \langle S \rangle (1 + k\varphi) = 0{,}45 \cdot 10^3 (1 + 3 \cdot 0{,}75) = 1{,}46 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

2. По формуле (13) определяется минимальное расчетное опасное напряжение

$$S_{0.min} = \langle S_0 \rangle (1 - l\nu) = 7{,}6 \cdot 10^3 (1 - 2 \cdot 0{,}06) = 6{,}7 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

3. По формуле (15) определяется характеристика безопасности

$$\gamma = \sqrt{-2 \ln\left(-\frac{\ln [p] \sqrt{1+\varphi^2}}{\varphi \bar{n} t_p}\right)} = \sqrt{-2 \ln\left(-\frac{\ln 0{,}99 \sqrt{1+0{,}75^2}}{0{,}75 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^8}\right)} =$$

$$= \sqrt{-2 \ln 1{,}67 \cdot 10^{-10}} = \sqrt{2 \cdot 22{,}50} = 6{,}71.$$

4. По формуле (14) определяется коэффициент запаса прочности

$$n_1 = \frac{(1-lv)(\varphi+\varphi\sqrt{\varphi^2+1})}{\varphi(1+\kappa\varphi)} = \frac{(1-2\cdot0{,}06)(0{,}75+0{,}75\cdot6{,}7\cdot1{,}25)}{0{,}75\ (1+3\cdot0{,}75)} = 2{,}54.$$

5. По формуле (11) производится проверка прочности оси барабана

$$\frac{S_{0.min}}{n_1} = \frac{6{,}7\cdot10^3}{2{,}54} = 2{,}63\cdot10^3 \text{ кгс/см}^2 > S_{max} = 1{,}46\cdot10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

Прочность оси обеспечена.

Пример 3. Определение диаметра расчетного сечения оси барабана при условии, что нагрузка является случайным процессом (случай А п.2.5).

Исходные данные аналогичны предыдущему примеру.

Дополнительные данные:

$\langle S_н \rangle = 3\cdot10^5$ кгс·см – математическое ожидание опасного уровня нагружения;

$k_н = 3$ – количество средних квадратических отклонений между $\langle S_н \rangle$ и $S_{н.max}$;

$\psi_н = 0{,}75$ – коэффициент вариации нагрузки.

Решение:

1. По формуле (17) определяется расчетное значение максимальной нагрузки

$$S_{н.max} = \langle S_н \rangle (1+k_н\psi_н) = 3\cdot10^5\ (1+3\cdot0{,}75) = 9{,}75\cdot10^5 \text{ кгс·см}.$$

2. По формуле (16) определяется момент сопротивления оси барабана

$$F = \frac{S_{н.max}\cdot n_1}{S_{0.min}} = \frac{9{,}75\cdot10^5\cdot2{,}54}{6{,}7\cdot10^3} = 3{,}7\cdot10^2 \text{ см}^3,$$

и следовательно,

$$d = \sqrt[3]{\frac{32F}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{32\cdot3{,}7\cdot10^2}{3{,}14}} = 15{,}6 \text{ см}.$$

Пример 4. Расчет вероятности безотказной работы вала механизма подъема по условию непревышения нагрузкой опасного уровня (случай А п.2.6.).

Исходные данные:

$d_в = 15$ см – диаметр вала в опасном сечении;

$\langle S_0 \rangle = 22{,}5\cdot10^5$ кгс·см; $\Delta S_0 = 1{,}3\cdot10^5$ кгс·см – среднее зна-

чение и цена разряда гистограммы уровня опасного нагружения. (по аналогии с примером по п.2.3.);

материал вала – сталь 34ХН3М (НВ = 270);

$p_1 = 0{,}02$; $p_2 = 0{,}14$; $p_3 = 0{,}34$; $p_4 = 0{,}34$; $p_5 = 0{,}14$; $p_6 = 0{,}02$; – частости появления нагрузок в соответствующих разрядах гистограммы опасного уровня нагружения (см. черт. 2).

$S_{0.min} = \langle S_0 \rangle - 3\Delta S_0 = 18{,}6 \cdot 10^5$ кгс·см;

$S_{0.max} = \langle S_0 \rangle + 3\Delta S_0 = 26{,}4 \cdot 10^5$ кгс·см – минимальное и максимальное значения опасного уровня нагружения;

$\langle S \rangle = 3 \cdot 10^5$ кгс·см; $S_{max} = 9 \cdot 10^5$ кгс·см – математическое ожидание и максимальное значение процесса нагружения;

$t_p = 2 \cdot 10^8$ с – время работы вала;

$n^p_к = 2{,}55 \cdot 10^{-1}$ 1/с; $n_н = 1{,}1$ 1/с – среднее число выбросов в единицу времени за уровни $R_к$ и $R_н$, полученное по осциллограммам.

Решение:

1. В соответствии с пунктом 2.6. определяются значения уровней R_{0i}, $R_к$, $R_н$ и коэффициент γ;

$$R_к = \frac{0{,}97\ S_{max}}{\langle S \rangle} = \frac{0{,}97 \cdot 9}{3} = 2{,}91;$$

$$R_н = \frac{0{,}85\ S_{max}}{\langle S \rangle} = \frac{0{,}85 \cdot 9}{3} = 2{,}55;$$

$$R_{01} = \frac{S_{0.min}}{\langle S \rangle} = \frac{18{,}6}{3} = 6{,}20;$$

$$R_{02} = \frac{S_{0\,min} + \Delta S_0}{\langle S \rangle} = \frac{19{,}9}{3} = 6{,}64;$$

$$R_{03} = \frac{S_{0.min} + 2\Delta S_0}{\langle S \rangle} = \frac{21{,}2}{3} = 7{,}06;$$

$$R_{04} = \frac{S_{0.min} + 3\Delta S_0}{\langle S \rangle} = \frac{22{,}5}{3} = 7{,}50;$$

$$R_{05} = \frac{S_{0.min} + 4\Delta S_0}{\langle S \rangle} = \frac{23{,}8}{3} = 7{,}94;$$

$$R_{06} = \frac{S_{0.min} + 5\Delta S_0}{\langle S \rangle} = \frac{25{,}1}{3} = 8{,}36;$$

$$\gamma = \frac{\ln n_н - \ln n_к}{[(R_к - 1)^2 - (R_н - 1)^2]} = \frac{\ln 1{,}1 - \ln 3{,}5 \cdot 10^{-1}}{[(2{,}91 - 1)^2 - (2{,}55 - 1)^2]} = 0{,}91.$$

2. По формуле (19) определяется среднее число выбросов в единицу времени за каждый из уровней i.

$$n_1 = 1,1 \; exp\{-0,91[(6,20-1)^2-(2,55-1)^2]\} = 1,1 \; exp(-22,5) =$$
$$= 1,1 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 8,2 \cdot 10^{-2} = 1,83 \cdot 10^{-10} \text{ 1/с};$$

$$n_2 = 1,1 \; exp\{(-0,91 \cdot [(6,64-1)^2 - (2,55-1)^2]\} = 1,1 exp(-29,4) =$$
$$= 1,1 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,11 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ 1/с};$$

$$n_3 = 1,1 \; exp\{-0,91 [(7,06-1)^2 - (2,55-1)^2]\} = 1,1 \, exp(-31,3) =$$
$$= 1,1 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,273 = 2,74 \cdot 10^{-14} \text{ 1/с};$$

$$n_4 = 1,1 \; exp\{-0,91 [(7,50-1)^2 - (2,55-1)^2]\} = 1,1 exp(-36,4) =$$
$$= 1,1 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 1,68 \cdot 10^{-16} \text{ 1/с};$$

$$n_5 = 1,1 \; exp\{-0,91 \cdot [(7,94-1)^2 - (2,55-1)^2]\} = 1,1 \; exp(-41,6) =$$
$$= 1,1 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,02 \cdot 10^{-1} = 9,12 \cdot 10^{-19} \text{ 1/с};$$

$$n_6 = 1,1 \; exp\{-0,91 [(8,36-1)^2 - (2,55-1)^2]\} = 1,1 \; exp(-47) =$$
$$= 1,1 (4,5 \cdot 10^{-6}) \, 4,9 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} = 4,12 \cdot 10^{-21} \text{ 1/с}.$$

3. Определяется среднее число выбросов в единицу времени за опасный уровень

$$n^* = \Sigma n_i p_i = 1,83 \cdot 10^{-10} \cdot 0,02 + 2,5 \cdot 10^{-12} \cdot 0,14 + 2,74 \cdot 10^{-14} \cdot$$
$$\cdot 0,34 + 1,68 \cdot 10^{-16} \cdot 0,34 + 9,12 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14 + 4,12 \cdot 10^{-21} \cdot 0,02 \approx 4,02 \cdot 10^{-12}.$$

4. По формуле (18) определяется вероятность неразрушения вала из условия непревышения нагрузкой опасного уровня.

$$p_н(t) = 1 - n^* t_р = 1 - 4,02 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^8 \approx 0,9992.$$

При совместном действии кручения и изгиба характеристики процесса нагружения можно определить по следующим зависимостям

$$\langle S \rangle = \sqrt{\langle S_н \rangle^2 + \langle S_к \rangle^2} \; ;$$

$$S_{max} = \sqrt{(S_{н.max})^2 + (S_{к.max})^2} \; ,$$

где $\langle S_н \rangle$, $\langle S_к \rangle$ – математические ожидания процесса нагружения при изгибе и кручении;

$S_{н.max}$, $S_{к\,max}$ – максимальные значения процесса нагружения при изгибе и кручении.

Количество выбросов в единицу времени приведенного момен-

та S за уровни $S_н$ и $S_к$ определяется непосредственно по осциллограммам.

Пример 5. Расчет вероятности безотказной работы вала механизма подъема по условию непревышения нагрузкой опасного уровня (случай Б п.2.7.).

Исходные данные:

$d_в$ = 12,0 см – диаметр вала;

$W_и$ = 169,6 см^3 – момент сопротивления сечения;

$\langle \sigma_т \rangle$ = 6,7·10^3 кгс/см^2 – математическое ожидание предела текучести для стали 34ХН3М;

$\langle S_о \rangle = \langle \sigma_т \rangle W_и$ = 11,4·10^5 кгс·см – математическое ожидание опасного уровня нагружения;

$\sigma_о$ = 0,7·10^5 кгс·см – среднее квадратическое отклонение опасного уровня нагружения;

$S_{о.max} = \langle S_о \rangle + 3\sigma_о$ = 11,4·10^5 + 3·0,7·10^5 = 13,5·10^5 кгс·см;

$S_{о.min} = \langle S_о \rangle - 3\sigma_о$ = 11,4·10^5 – 3·0,7·10^5 = 9,3·10^5 кгс·см, максимальное и минимальное значения опасного уровня нагружения;

S_{max} = 9·10^5 кгс·см; S_{min} = 0; $\langle S \rangle$ = 3·10^5 кгс·см;

σ_S = 2,2·10^5 кгс·см – характеристики процесса нагружения в опасном сечении вала;

$t_р$ = 2·10^8 с – расчетное время работы вала;

n = 7,5·10^{-7} 1/с – количество нагружений в единицу времени.

Решение:

В соответствии с п.2.7. и формулой (21) определяется

$$C_б^1 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left\{\Phi\left[\frac{(13,5\cdot10^5-0)-(11,4\cdot10^5-3\cdot10^5)}{\sqrt{2}\ \sqrt{0,7^2+2,2^2}\cdot10^5}\right]-\right.}$$

$$\left.\frac{1}{\Phi\left[\frac{(9,3\cdot10^5-9,0\cdot10^5)-(11,4\cdot10^5-3\cdot10^5)}{\sqrt{2}\ \sqrt{0,7^2+2,2^2}\cdot10^5}\right]}\right\} = 1,014;$$

$$P_н(t) = \left\{\frac{1,014}{2}\ \Phi\left[\frac{(13,5\cdot10^5-0)-(11,4\cdot10^5-3\cdot10^5)}{\sqrt{2}\ \sqrt{0,7^2+2,2^2}\cdot10^5}\right]+\right.$$

$$+\frac{1,014}{2}\Phi\left[\frac{(11,4\cdot10^5-3\cdot10^5)}{\sqrt{2}\ \sqrt{0,7^2+2,2^2}\cdot10^5}\right]\Bigg\}^{150}=$$

$$=\left\{\frac{1,014}{2}\left[\Phi(1,56)+\Phi(2,58)\right]\right\}^{150}=(0,9997)^{150}=0,9660.$$

Пример 6. Расчет прочности вала механизма подъема по заданной нормированной величине безотказной работы, когда нагрузка является случайной величиной (случай Б, п.2.8.).

Исходные данные:

$\langle S\rangle=0,77\cdot10^3$ кгс/см^2 – математическое ожидание уровня напряжений;

$\varphi=0,73$ – коэффициент вариации действующих напряжений;

$k=2,7$ – количество средних квадратических отклонений между $\langle S\rangle$ и S_{max};

$\nu=0,06$ – коэффициент вариации опасного уровня напряжений;

$\langle S_0\rangle=6,7\cdot10^3$ кгс/см^2 – математическое ожидание опасного уровня напряжений,

$C_0'\approx1,6$; $l=2$; $\varphi=1,4$; $[p]=0,99$; $t_p=2\cdot10^2$ с; $\bar{n}=7,5\cdot10^{-7}$ 1/с.

Решение:

1. По формуле (12) определяется максимальное расчетное напряжение.

$$S_{max}=\langle S\rangle\cdot(1+k\varphi)=0,77\cdot10^3\ (1+2,7\cdot0,73)=2,3\cdot10^3\ \text{кгс/см}^2.$$

2. По формуле (13) определяется минимальное расчетное опасное напряжение

$$S_{0.min}=\langle S_0\rangle(1-l\nu)=6,7\cdot10^3\,(1-2\cdot0,06)=5,9\cdot10^3\ \text{кгс/см}^2.$$

3. По формуле (24) определяется значение функции Лапласа

$$\Phi(x)=2\sqrt[nt_p]{[p]}-1=2\sqrt[150]{0,99}-1\approx1,0.$$

4. По таблице устанавливается, что данному значению $\Phi(x)$ соответствует величина

$$x=3,0.$$

5. По формуле (23) определяется характеристика безопасности $\gamma_1=x\sqrt{2}=3,0\cdot\sqrt{2}=4,25.$

6. По формуле (14) определяется коэффициент запаса прочности

$$n_1 = \frac{(1 - l\nu)(\varphi + \psi\gamma\sqrt{\varphi^2 + 1})}{\varphi(1 + k\varphi)} = \frac{(1 - 2 \cdot 0{,}06)(1{,}40 + 0{,}73 \cdot 4{,}25 \cdot 1{,}72)}{1{,}40\,(1 + 2{,}7 \cdot 0{,}73)} =$$

$$= 1{,}41.$$

7. По формуле (11) производится проверка прочности вала

$$\frac{S_{a.min}}{n_1} = \frac{5{,}9 \cdot 10^3}{1{,}41} = 4{,}18 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2 > S_{max} = 2{,}3 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

Прочность вала обеспечена.

Пример 7. Определение диаметра расчетного сечения оси барабана механизма подъема, при условии, что нагрузка является случайной величиной (п.2.8.).

Исходными данными являются данные предыдущих примеров 5 и 6. Помимо этого

$$k_н = 2{,}7; \quad \psi_н = 0{,}73; \quad \langle S_н \rangle = 3 \cdot 10^5 \text{ кгс·см}.$$

Решение:

1. По формуле (17) определяется расчетное значение максимальной нагрузки

$$S_{н.max} = \langle S_н \rangle (1 + k_н \psi_н) = 3 \cdot 10^5 (1 + 2{,}7 \cdot 0{,}73) = 9 \cdot 10^5 \text{ кгс·см}.$$

2. По формуле (16) определяется момент сопротивления оси

$$f = \frac{S_{н.max}\, n_1}{S_{a.min}} = \frac{9 \cdot 10^5 \cdot 1{,}41}{5{,}9 \cdot 10^3} = 2{,}16 \cdot 10^2 \text{ см}^3,$$

откуда

$$d_в = \sqrt[3]{\frac{32{,}2 \cdot 16 \cdot 10^2}{3{,}14}} = 13{,}0 \text{ см}.$$

Пример 8. Расчет вероятности безотказной работы по условию сохранения циклической прочности оси барабана механизма подъема при изгибе.

Исходные данные:

материал оси – сталь 34ХН3М (НВ = 270);

$d_0 = 20{,}0$ см – диаметр оси в опасном сечении;

$W_и = 785$ см^3 – момент сопротивления сечения;

$k_G(d) = 2{,}9$ – эффективный коэффициент концентрации в расчетном сечении;

$\langle \sigma_{-1} \rangle = 3{,}7 \cdot 10^3$ кгс/см^2 – средняя величина предела выносливости материала по изгибу;

$\rho = 0{,}12$ – коэффициент вариации предела выносливости материала;

$\sigma_{пр}^{min} = 0$; $\sigma_{пр}^{max} = 1{,}2 \cdot 10^3$ кгс/см^2; $\Delta\sigma_{пр} = 1 \cdot 10^2$ кгс/см^2 – минимальное, максимальное значения и цена разряда гистограммы приведенных напряжений;

$n = 12$ – число разрядов гистограммы приведенных напряжений;

$p_1 = 0{,}01$; $p_2 = 0{,}05$; $p_3 = 0{,}10$; $p_4 = 0{,}18$; $p_5 = 0{,}20$; $p_6 = 0{,}12$; $p_7 = 0{,}11$; $p_8 = 0{,}09$; $p_9 = 0{,}07$; $p_{10} = 0{,}03$; $p_{11} = 0{,}01$; $p_{12} = 0{,}01$ – частости разрядов гистограммы приведенных напряжений;

$N = 2 \cdot 10^6$ – количество нагружений вала за 20 лет эксплуатации крана;

$N_0 = 2 \cdot 10^6$ – базовое число циклов нагружения;

$m = 9$ – показатель степени кривой усталости.

Решение:

1. Определяются характеристики предела выносливости оси при изгибе.

$$\langle \sigma_{-1к} \rangle = \frac{\langle \sigma_{-1} \rangle}{K_{\sigma d}} = \frac{3{,}7 \cdot 10^3}{2{,}9} = 1{,}3 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_{\sigma к} = \rho(\sigma_{-1к}) = 0{,}12 \cdot 1{,}3 \cdot 10^3 = 0{,}16 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_{-1к}^{max} = \langle \sigma_{-1к} \rangle + 3\,\sigma_{\sigma к} = 1{,}3 \cdot 10^3 + 0{,}48 \cdot 10^3 = 1{,}78 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_{-1к}^{min} = \langle \sigma_{-1к} \rangle - 3\,\sigma_{\sigma к} = 1{,}3 \cdot 10^3 - 0{,}48 \cdot 10^3 = 0{,}82 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2,$$

2. Выбирается начальная величина порогового значения неограниченного предела усталости

$$\sigma_{-1к}^{*} = 0{,}5 \cdot \langle \sigma_{-1к} \rangle = 0{,}5 \cdot 1{,}3 \cdot 10^3 = 0{,}65 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2;$$

$$0{,}5\,\sigma_{-1к}^{*} = 0{,}5 \cdot 0{,}65 \cdot 10^3 = 0{,}32 \cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

3. Определяется значение сумм в формуле (27) и устанавливается значение корректирующего коэффициента α.

а) $$\sum_{0{,}5\sigma_{-1к}^{*}}^{\sigma_{пр}^{max}} \sigma_{пр\,i}\, p_i = \sum_{0{,}32 \cdot 10^3}^{1{,}2 \cdot 10^3} \sigma_{пр\,i}\, p_i = 3{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}18 +$$

$$+ 4{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}20 + 5{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}12 + 6{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}11 + 7{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}09 + 8{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}07 +$$

$$+ 9{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}03 + 10{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}01 + 11{,}5 \cdot 10^2 \cdot 0{,}01 = 4{,}67 \cdot 10^2;$$

б) $\sum_{0,5\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} p_i = \sum_{0,32\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} p_i = 0,18+0,20+0,12+0,11+$
$+0,09+0,07+0,03+0,01+0,01 = 0,82;$

в) $a = \dfrac{\sum \sigma_{прi}\, p_i - 0,5\sigma^{*}_{-1к}}{\sum p_i} = \dfrac{4,67\cdot10^2 - 3,2\cdot10^2}{0,82} = \dfrac{}{12\cdot10^2 - 3,2\cdot10^2} = 0,30.$

4. Определяется значение суммы подкоренного выражения в формуле (26)

$$\sum_{\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} \sigma^{m}_{прi}\, p_i = \sum_{0,65\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} \sigma^{m}_{пр}\, p_i = (6,5\cdot10^2)^9\cdot0,11 +$$
$$(7,5\cdot10^2)^9 + (8,5\cdot10^2)^9\cdot0,07 + (9,5\cdot10^2)^9\cdot0,03 + (10,5\cdot10^2)^9\cdot0,01 +$$
$$+ (11,5\cdot10^2)^9\cdot0,01 = 0,095\cdot10^{27}.$$

5. По формуле (26) определяется первое приближение значения неограниченного предела выносливости

$$\sigma^{*(1)}_{-1к} = \sqrt[m]{\frac{N}{aN_0} \sum_{\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} \sigma^{m}_{прi}\, p_i} = \sqrt[9]{\frac{2\cdot10^6}{0,3\cdot2\cdot10} \cdot 0,095\cdot10^{27}} = 0,9\cdot10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

6. Производится расчет сумм в формуле (27) и устанавливается новое значение коэффициента a из условия, что

$\sigma^{*}_{-1к} = \sigma^{*(1)}_{-1к} = 9\cdot10^2$ кгс/см^2; $0,5\,\sigma^{*}_{-1к} = 4,5\cdot10^2$ кгс/см^2.

В этом случае

а) $\sum_{0,5\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} \sigma_{пр}\, p_i = \sum_{0,45\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} \sigma^{m}_{пр}\, p_i = 5,5\cdot10^2\cdot0,12 + 6,5\cdot10^2\cdot0,11 +$
$+ 7,5\cdot10^2\cdot0,09 + 8,5\cdot10^2\cdot0,07 + 9,5\cdot10^2\cdot0,03 + 10,5\cdot10^2\cdot0,01 + 11,5\cdot10^2\cdot0,01 =$
$= 3,14\cdot10^2;$

б) $\sum_{0,5\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} p_i = \sum_{0,45\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} p_i = 0,12+0,11+0,09+0,07+0,03 + +0,01+0,01 = 0,44;$

в) $$a = \frac{\frac{3,14\cdot10^2}{0,44} - 4,5\cdot10^2}{12\cdot10^2 - 4,5\cdot10^2} = \frac{2,64\cdot10^2}{7,5\cdot10^2} = 0,35.$$

7. Определяется значение суммы в формуле (26)

$$\sum_{\sigma^{*}_{-1к}}^{\sigma^{max}_{пр}} \sigma^{m}_{пр i}\, p_i = \sum_{9\cdot10^2}^{12\cdot10^3} \sigma^{m}_{пр i}\, p_i = (9,5\cdot10^2)^9\cdot0,03 + + (10,5\cdot10^2)^9\cdot0,01 + (11,5\cdot10^2)^9\cdot0,01 = 0,071\cdot10^{27}.$$

8. Определяется второе приближенное значение неограниченного предела выносливости

$$\sigma^{*(2)}_{-1к} = \sqrt[9]{\frac{2,10^6}{0,35\cdot2\cdot10^6}\cdot0,071\cdot10^{27}} = 0,84\cdot10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

Это значение $\sigma^{*(2)}_{-1к}$ приемлемо, так как нижний порог суммирования в формуле (26) был равным $0,9\cdot10^3$ кгс/см^2.

9. По формуле (9) с учетом замены величины S на величину $\sigma_{-1к}$ определяется значение коэффициента C_3

$$C_3 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{\sigma^{max}_{-1к} - <\sigma_{-1к}>}{\sqrt{2}\,\sigma_{\sigma к}}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma^{min}_{-1к} - <\sigma_{-1к}>}{\sqrt{2}\,\sigma_{\sigma к}}\right)\right]} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{1,78\cdot10^3 - 1,3\cdot10^3}{\sqrt{2}\cdot0,16\cdot10^3}\right) - \Phi\left(\frac{0,82\cdot10^3 - 1,3\cdot10^3}{\sqrt{2}\cdot0,16\cdot10^3}\right)\right]} = 1,0028.$$

10. По формуле (25) определяется вероятность неразрушения оси при изгибе по условию сохранения циклической прочности:

$$P_ц(t) = \frac{C_3}{2}\left[\Phi\left(\frac{\sigma^{max}_{-1к} - <\sigma_{-1к}>}{\sqrt{2}\,\sigma_{\sigma к}}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma^{*}_{-1к} - <\sigma_{-1к}>}{\sqrt{2}\,\sigma_{\sigma к}}\right)\right] =$$

$$= \frac{1,0028}{2}\left[\Phi\left(\frac{1,78\cdot10^3-1,3\cdot10^3}{\sqrt{2}\cdot0,16\cdot10^3}\right)-\Phi\left(\frac{0,84\cdot10^3-1,3\cdot10^3}{\sqrt{2}\cdot0,16\cdot10^3}\right)\right]=0,9993.$$

11. Расчет приближенного значения неограниченного предела выносливости производится по формулам, аналогичным (26), (27). При этом принимается начальное значение $\sigma_{-1к} = <\sigma_{-1к}>$.

В том случае, когда $<\sigma_{-1к}> > \sigma_{пр}^{max}$, допускается нижний предел интегрирования в формуле (26) принимать равным $\sigma_{-1к}^{min}$.

$$\sigma_{-1к}^{*} = <\sigma_{-1к}> = 1,3\cdot10^3 \text{ кгс/см}^2;$$
$$0,5\,\sigma_{-1к}^{*} = 0,5\cdot1,3\cdot10^3 = 0,65\cdot10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

12. Определяются значения сумм в формуле (26)

а) $$\sum_{0,5\sigma_{-1к}^{*}}^{\sigma_{пр}^{max}} \sigma_{пр.i}\,p_i = \sum_{0,65\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} \sigma_{пр.i}\,p_i = 6,5\cdot10^2\cdot0,11 +$$
$$+ 7,5\cdot10^2\cdot0,09 + 8,5\cdot10^2\cdot0,07 + 9,5\cdot10^2\cdot0,03 + 10,5\cdot10^2\cdot0,01 +$$
$$+ 11,5\cdot10^2\cdot0,01 = 2,49\cdot10^2;$$

б) $$\Sigma p_i = \sum_{0,65\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} p_i = 0,11+0,09+0,07+0,03+0,01+0,01 = 0,32;$$

в) $$\sum_{\sigma_{-1к}^{min}}^{\sigma_{пр}^{max}} \sigma_{пр.i}^{m}\,p_i = \sum_{0,82\cdot10^3}^{1,2\cdot10^3} \sigma_{пр.i}\,p_i = (0,85\cdot10^3)^9\cdot0,07 +$$
$$+ (0,95\cdot10^3)^9\cdot0,03 + (1,05\cdot10^3)^9\cdot0,01 + (1,15\cdot10^3)^9\cdot0,01 = 0,687\cdot10^{27}.$$

13. По формуле (27) определяется сумма относительных повреждений

$$a = \frac{\frac{\Sigma\sigma_{пр}\,p_i}{\Sigma p_i} - 0,5\sigma_{-1к}^{*}}{\sigma_{пр}^{max} - 0,5\sigma_{-1к}^{*}} = \frac{2,49\cdot10^2\cdot0,32 - 0,65\cdot10^3}{1,2\cdot10^3 - 0,65\cdot10^3} = 0,24.$$

14. Вычисляется пороговое значение неограниченного предела выносливости по формуле (26)

$$\sigma^{*}_{-1к} = \sqrt[m]{\frac{N}{aN_0}\sum^{1,2\cdot10^3}_{1,06\cdot10,3}\sigma^{m}_{np.i}\,p_i} = \frac{2\cdot10^6}{0,24\cdot2\cdot10^6}\cdot0,087\cdot10^{27} =$$

$= 0,89\cdot10^3$ кгс/см^2.

15. Относительная величина погрешности по эквивалентному напряжению вычисляется как

$$\Delta = \frac{\sigma^{*}_{-1к} - \sigma^{*(2)}_{-1к}}{\sigma^{*(2)}_{-1к}} = \frac{8,9\cdot10^2 - 8,4\cdot10^2}{8,4\cdot10^2}\cdot 100\% = 6,0\%.$$

16. При подстановке значения $\sigma^{*}_{-1к} = 0,89\cdot10^3$ кгс/см^2 в формулу (25) аналогично пункту 10 определяется вероятность неразрушения оси $p'_{ц}(t) = 0,9952$.

Относительная погрешность по вероятности неразрушения оси при изгибе определится как

$$\delta = \frac{p_{ц}(t) - p'_{ц}(t)}{p_{ц}(t)} = \frac{0,9993 - 0,9952}{0,9993}\ 100\% = 0,41\%.$$

Пример 9. Расчет вероятности безотказной работы по условию сохранения циклической прочности вала механизма подъема при кручении (пункт 3.5.).

Исходные данные:

Материал вала – сталь 34ХН3М;

$k_\tau(d) = 2,7$ – эффективный коэффициент концентрации вала в расчетном сечении;

$<\tau_{-1}> = 2,2\cdot10^3$ кгс/см^2 – средняя величина предела выносливости материала по кручению;

$\rho = 0,14$ – коэффициент вариации предела выносливости материала;

$<\tau_1> = 6\cdot10^2$ кгс/см^2; $\sigma_{\tau_1} = 0,8\cdot10^2$ кгс/см^2 – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение при обработке нагрузки по огибающей (обработка по амплитудам низкочастотной составляющей);

$<\tau_2> = 2,5\cdot10^2$ кгс/см^2; $\sigma_{\tau_2} = 2\cdot10^2$ кгс/см^2 – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение при обработке по максимальным и минимальным значениям нагрузки;

$N = 2\cdot10^6$ – количество нагружений вала;

$N_0 = 2\cdot10^6$ – базовое число нагружений;

$m = 9$ – показатель степени кривой усталости;

$p_1 = 0,15$ – вероятность появления 1-го закона (обработка по огибающей);

$p_2 = 0,85$ – вероятность появления 2-го закона (обработка по максимальным и минимальным значениям);

$C_3 = 1,0028$.

Решение:

1. Определяются характеристики предела выносливости вала по кручению

$$<\tau_{-1к}> = \frac{<\tau_{-1}>}{K_\tau(d)} = \frac{2,2\cdot10^3}{2,7} = 8,15\cdot10^2 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau_{бк} = \rho <\tau_{-1к}> = 0,14\cdot8,15\cdot10^2 = 1,14\cdot10^2 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau_{-1к} = <\tau_{-1к}> + 3\tau_{бк} = 8,15\cdot10^2 + 3\cdot1,14\cdot10^2 = 11,57\cdot10^2 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau_{-1к} = <\tau_{-1к}> - 3\tau_{бк} = 8,15\cdot10^2 - 3\cdot1,14\cdot10^2 = 4,73\cdot10^2 \text{ кгс/см}^2,$$

2. Определяются относительные характеристики законов распределения приведенных амплитуд

$$<x_1> = \frac{<\tau_1>}{<\tau_{-1к}>} = \frac{6\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 0,736;$$

$$x_1^{max} = \frac{<\tau_1> + 4\sigma\tau_1}{<\tau_{-1к}>} = \frac{6\cdot10^2 + 4\cdot0,8\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 1,13;$$

$$x_1^{min} = \frac{<\tau_1> - 4\sigma\tau_1}{<\tau_{-1к}>} = \frac{6\cdot10^2 - 4\cdot0,8\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 0,344;$$

$$x_{\sigma 1} = \frac{\sigma\tau_1}{<\tau_{-1к}>} = \frac{0,8\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 0,098;$$

$$<x_2> = \frac{<\tau_2>}{<\tau_{-1к}>} = \frac{2,5\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 0,307; \qquad x_2^{min} = 0;$$

$$x_2^{max} = \frac{<\tau_2> + 4\sigma\tau_2}{<\tau_{-1к}>} = \frac{2,5\cdot10^2 + 4,2\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 1,290;$$

$$x_{\sigma 2} = \frac{\sigma\tau_2}{<\tau_{-1к}>} = \frac{2\cdot10^2}{8,15\cdot10^2} = 0,246.$$

3. Определяется значение коэффициента k_J по п.3.5., формула (34); $k_1 \approx 1,0$;

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{2}\left[\Phi\left(\frac{1,29-0,307}{\sqrt{2}\cdot 0,246}\right) - \Phi\left(\frac{0-0,307}{\sqrt{2}\cdot 0,246}\right)\right]} = 1,12.$$

4. Определяются значения функций h_j и h_j^{max}

$$h_1^{max} = \frac{x_1^{max} - \langle x_i \rangle}{x_{б_1}} = \frac{1,13-0,736}{0,098} = 4,02;$$

$$h_1 = \frac{-\langle x_1 \rangle + 0,5}{x_{б_1}} = \frac{-0,736+0,5}{0,098} = -2,41;$$

$$h_2^{max} = \frac{x_2^{max} - \langle x_2 \rangle}{x_{б_2}} = \frac{1,29-0,307}{0,246} = 4,0;$$

$$h_2 = \frac{0,5 - \langle x_2 \rangle}{x_{б_2}} =$$

$$= \frac{0,5-0,307}{0,246} = 0,785.$$

5. По черт. 7 определяются значения функций

$$f_{11} = f_\alpha(h_1^{max}) = f_\alpha(4,02) = 0,45;$$
$$f_{21} = f_\alpha(h_1) = f_\alpha(-2,41) = -0,42;$$
$$f_{31} = f_\beta(h_1^{max}) = f_\beta(4,02) = 0,50;$$
$$f_{41} = f_\beta(h_1) = f_\beta(-2,41) = -0,48;$$
$$f_{12} = f_\alpha(h_2^{max}) = f_\alpha(4,0) = 0,45;$$
$$f_{22} = f_\alpha(h_2) = f_\alpha(0,485) = 0,18;$$
$$f_{32} = f_\beta(h_2^{max}) = f_\beta(4,0) = 0,50;$$
$$f_{42} = f_\beta(h_2) = f_\beta(0,485) = 0,29.$$

6. Определяется значение коэффициентов β_j ; c_j по формулам (35), (36)

$$\beta_1 = 0,098(0,45+0,42)+0,736(0,50+0,48) = 0,085+0,725 = 0,840;$$
$$C_1 = 0,98;$$
$$\beta_2 = 1,12\cdot 0,246(0,45-0,18)+0,307(0,50-0,29) = 0,147;$$
$$C_2 = 1,12(0,50-0,29) = 0,235.$$

7. По формуле (31) определяется значение коэффициента α

$$\alpha = \frac{\frac{0,15\cdot 0,81+0,85\cdot 0,147}{0,15\cdot 0,98+0,85\cdot 0,235} - 0,5}{1,29-0,5} = \frac{0,213}{0,79} = 0,278.$$

8. По черт. 6, б при $m = 9$ определяется значение

$q_1 = 0{,}61$ (при $\langle x_1 \rangle = 0{,}736$; $x_{\sigma_1} = 0{,}098$);
$q_2 = 0{,}52$ (при $\langle x_2 \rangle = 0{,}307$; $x_{\sigma_2} = 0{,}246$).

9. Определяется пороговое значение неограниченного предела выносливости вала при кручении согласно выражению (30)

$$\tau^*_{-1к} = 8{,}15 \cdot 10^2 \frac{1}{\sqrt[9]{0{,}270}} \sqrt[9]{0{,}15 \cdot 0{,}61^9 + 1{,}12 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}52^9} =$$

$$= 5{,}07 \cdot 10^2 \text{ кгс/см}^2.$$

10. Определяется вероятность неразрушения вала при кручении по условию сохранения циклической прочности

$$P_ц(t) = \frac{C_3}{2}\left[\Phi\left(\frac{\tau^{max}_{-1к} - \langle \tau_{-1к} \rangle}{\sqrt{2}\,\tau_{\sigma_к}}\right) - \Phi\left(\frac{\tau^*_{-1к} - \langle \tau_{-1к} \rangle}{\sqrt{2}\,\tau_{\sigma_к}}\right)\right] =$$

$$= \frac{1{,}0028}{2}\left[\Phi\left(\frac{11{,}57 \cdot 10^2 - 8{,}15 \cdot 10^2}{\sqrt{2} \cdot 1{,}14 \cdot 10^2}\right) - \Phi\left(\frac{5{,}04 \cdot 10^2 - 8{,}15 \cdot 10^2}{\sqrt{2} \cdot 1{,}14 \cdot 10^2}\right)\right] =$$

$$= \frac{1{,}0028}{2}\left[\Phi(2{,}12) - \Phi(1{,}92)\right] = 0{,}9980.$$

11. В случае совместного действия изгиба и кручения устанавливаются пороговые значения при изгибе $\sigma^*_{-1к}$ (см. пример 10) и кручении $\tau^*_{-1к}$.

Эквивалентное напряжение определяется согласно следующей зависимости

$$S^*_{-1к} = \sqrt{(\sigma^*_{-1к})^2 + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \cdot (\tau^*_{-1к})^2} \qquad \text{кгс/см}^2.$$

Дальнейший расчет вероятности безотказной работы по условию сохранения циклической прочности осуществляется по формуле (25) при условии замены величины $\sigma^*_{-1к}$ на $S^*_{-1к}$.

Пример 10. Расчет циклической прочности оси барабана механизма подъема (пункт 3.6.).

Исходные данные аналогичны примеру 9. Помимо этого

$\langle \sigma_{-1к} \rangle = 1{,}3 \cdot 10^3$ кгс/см^2; $\sigma^*_{-1к} = 0{,}84 \cdot 10^3$ кгс/см^2; $C_3 \approx 1{,}0$; $[p] = 0{,}99$; $S^*_{пр} = 6{,}6 \cdot 10^5$ кгс·см; $\rho = 0{,}12$.

Решение:

1. По формуле (41) определяется значение функции Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{2}{C_3}[p] - 0{,}9972 = 1{,}9800 - 0{,}9972 = 0{,}9828.$$

2. По таблице или графику на черт. 4 устанавливается, что этому значению $\Phi(x)$ соответствует величина

$$x = 1{,}68.$$

3. По формуле (40) определяется коэффициент запаса прочности

$$n_2 = \frac{1}{1 - \sqrt{2}\,xp} = \frac{1}{1 - \sqrt{2}\cdot 1{,}68\cdot 0{,}12} = 1{,}4.$$

4. По формуле (39) производится проверка прочности оси

$$\frac{\langle \sigma_{-1к} \rangle}{n_2} = \frac{1{,}3\cdot 10^3}{1{,}4} = 0{,}93\cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2 > \sigma^*_{-1к} = 0{,}84\cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2.$$

Пример 11. Определение диаметра расчетного сечения оси барабана по условию сохранения циклической прочности (пункт 3.7.).

На основании данных примеров 9 и 10 по формуле (42) определяется момент сопротивления оси барабана

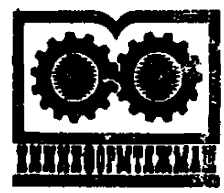
$$F = \frac{S^*_{пр}\, n_2}{\langle \sigma_{-1} \rangle} = \frac{6{,}6\cdot 10^5 \cdot 1{,}286}{1{,}3\cdot 10^3} = 6{,}55\cdot 10^2 \text{ см}^3,$$

откуда диаметр оси

$$d = \sqrt[3]{\frac{32F}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{32\cdot 6{,}55\cdot 10^2}{3{,}14}} = 18{,}9 \approx 19 \text{ см}.$$

Подп. к печ. 7/IV-78 г. Формат 60x90 1/16
Печ. л. 2,25 Уч.-изд. л. 1,65 Тираж 430 экз.
Зак. инст. 22/78 Зак. тип. 217

НИИинформтяжмаш, 129835, ГСП, Москва, И-90, Троицкая ул., 17
Отдел внедрения процессов микрофильмирования
и оперативной печати НИИинформтяжмаша



Заказ 22/78

gost.e-ecolog.ru