

Е. П. БЛОХИН, М. Л. КОРОТЕНКО, С. В. МЯМЛИН, Р. Б. ГРАНОВСКИЙ,
 В. Л. ГОРОБЕЦ, Н. Я. ГАРКАВИ, Е. Ф. ФЕДОРОВ, В. В. КЛЮЕВСКИЙ (ДИИТ),
 Ю. М. ЧЕРКАШИН (ВНИИЖТ, Россия),
 Л. А. МАНАШКИН (Mechanical Engineering Department, NJIT, США)

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Запропоновано методіку експериментальної оцінки втомлювальної міцності конструкції за допомогою трьохелементної розетки деформацій.

Предлагается методика экспериментальной оценки усталостной прочности конструкции при помощи трехэлементной розетки деформаций.

A method of experimental assessment of anti-fatigue strength of a structure with the use of three-element fork of deformations has been offered.

Для оценки усталостной прочности деталей из малоуглеродистых и низколегированных сталей достаточно часто [1–3] пользуются кривой Велера, которая строится в предположении, что

$$N\sigma^m(N) = \text{const}, \quad (1)$$

где $\sigma(N) \geq \sigma_{-1}$ – амплитуда приведенных циклов колебаний напряжения [3; 4]; σ_{-1} – предел усталости по нормальным напряжениям при изгибе; N – количество полных циклов изменения напряжения в диапазоне

$$-\sigma(N) \leq \sigma \leq +\sigma(N) \quad (2)$$

до полного разрушения образца; показатель степени m А. С. Гусев [2] называет параметром циклической трещиностойкости металла.

Для сварных и литых рам и балок в зависимости от материала Нормы [5] предлагают принимать: $m \approx 4$ для малоуглеродистых сталей, $m \approx 4,5$ для низколегированных сталей.

В условиях эксплуатации механических конструкций А. С. Гусев [2] предлагает плоское напряженное состояние на поверхности детали в каждый момент времени определять при помощи трехэлементной розетки деформаций, где деформации $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ измеряются датчиками, ориентированными во взаимно перпендикулярных направлениях, а $\varepsilon_3(t)$ – датчиком, ориентированным вдоль биссектрисы угла между направлениями измерения $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$.

Нормальные и касательные напряжения плоского напряженного состояния в плоскости розетки согласно [2] определяются зависимостями:

$$\sigma_x(t) = A(\varepsilon_1(t) + \mu\varepsilon_2(t)); \quad (3)$$

$$\sigma_y(t) = A(\varepsilon_2(t) + \mu\varepsilon_1(t)); \quad (4)$$

$$\tau_{x,y}(t) = B(2\varepsilon_3(t) - \varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t)), \quad (5)$$

где

$$A = E/(1 - \mu^2); \quad B = 0,5E/(1 + \mu);$$

E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

Очевидно, что при $\sigma_z = \tau_{x,z} = \tau_{y,z} = 0$ нормальные и касательные напряжения (σ_v и τ_v) в площадках, определяемых перпендикулярным к этим площадкам вектором

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \cos(v, x) \\ \cos(v, y) \\ \cos(v, z) \end{bmatrix},$$

определяются зависимостями [2]

$$\begin{aligned} \sigma_v(t) &= \vec{v}' \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & 0 \\ \tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{v} = \\ &= \sigma_x(t) \cos^2(v, x) + \sigma_y(t) \cos^2(v, y) + \\ &+ 2\tau_{x,y}(t) \cos(v, x) \cos(v, y), \quad (6) \end{aligned}$$

$$\bar{\tau}_v(t) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & 0 \\ \tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{v} - \sigma_v(t) \bar{v}. \quad (7)$$

Здесь \bar{v}' – матрица-строка (транспонированная матрица-столбец \bar{v}); (v, x) и (v, y) – углы между вектором \bar{v} и положительными направлениями осей датчиков, фиксирующих процессы $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$; (v, z) – угол между вектором \bar{v} и перпендикуляром к плоскости розетки [6; 7]; нормальное напряжение σ_v – скаляр, касательное напряжение $\bar{\tau}_v$ – вектор;

$$\cos^2(v, x) + \cos^2(v, y) + \cos^2(v, z) = 1. \quad (8)$$

Для определения циклограммы нагружения в каждой площадке А. С. Гусев [2] предлагает пользоваться условным напряжением

$$\sigma_p(t) = (2 - \lambda)\sigma_v(t) + (\lambda - 1)|\bar{\tau}_v(t)|, \quad (9)$$

где

$$1 \leq \lambda = \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} \leq 2;$$

τ_{-1} – предел усталости по касательным напряжениям. При этом А. С. Гусев [2] отмечает, что усталость металла обычно определяется только нормальными напряжениями (т. е. $\lambda = 1$).

На рис. 1 приведен усталостный излом цилиндрического образца, испытывавшего циклический изгиб.

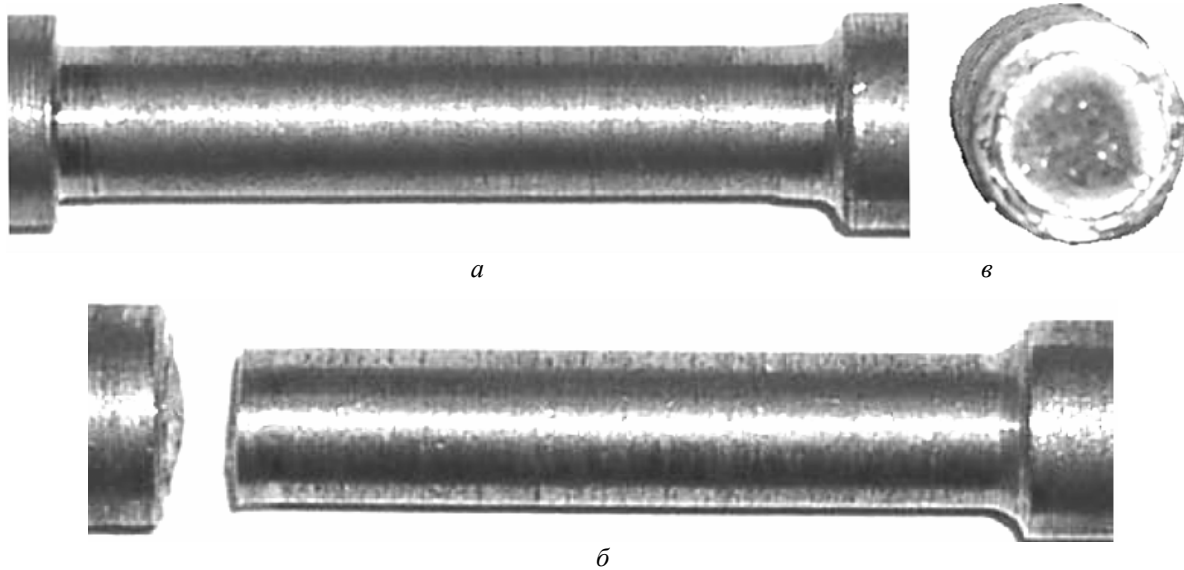


Рис. 1. Усталостное разрушение горизонтально расположенного вращающегося вала вертикальной силой (циклический изгиб, ≈ 6000 циклов до разрушения): а – вал до разрушения; б – вал после разрушения; в – усталостный излом вала (плоский излом, перпендикулярный продольной оси вала)

На рис. 1, в заметна концентричная боковой поверхности вала окружность, являющаяся границей развивавшейся усталостной трещины.

На рис. 2 и 3 приведены усталостные изломы цилиндрических образцов, испытывавших циклические изгиб и кручение. На рис. 2 показано усталостное разрушение образца № 1 из низколегированной стали диаметром 8 мм циклическими изгибно-крутильными колебаниями (чередующиеся 82 цикла крутильных колебаний и 21 цикл изгибных колебаний; амплитудные нормальные напряжения превышали предел упругости по нормальным напряжениям, амплитудные касательные напряжения превышали предел упругости по касательным напряжениям).

На рис. 2 и рис. 3, а, б, хорошо заметны продольные и преимущественно продольные усталостные трещины. На рис. 3, в приведен вид сверху на один из обломков, изображенных на рис. 2. Зарождающиеся трещины – радиальные или близкие к радиальным. Развиваются трещины не только в радиальном направлении.



Рис. 2



Рис. 3. Усталостное разрушение образца циклическими изгибно-крутильными колебаниями (амплитудные нормальные напряжения превышали предел упругости по нормальным напряжениям, амплитудные касательные напряжения превышали предел упругости по касательным напряжениям): *а* – усталостный излом образца № 2 из стали Ст3 диаметром 4 мм (чередующиеся 14 циклов крутильных колебаний и 3 цикла изгибных колебаний); *б* – усталостный излом образца № 3 из стали Ст0 диаметром 0,8 мм (чередующиеся 17 циклов крутильных колебаний и 3 цикла изгибных колебаний); *в* – усталостный излом образца № 1 (см. рис. 2)

Как видно из рис. 2, 3, усталостный излом не всегда приурочен к направлению, перпендикулярному наибольшему нормальным циклическим напряжениям (так при циклическом крутильном нагружении наибольшие нормальные напряжения соответствуют площадке, расположенной под углом 45° к продольной оси образца, а усталостные трещины при циклическом кручении – продольные).

Отметим, что нормативная для вагоностроения документация [1] предписывает определять усталостную прочность несущих конструкций железнодорожных вагонов из выражения

$$\sigma_{\text{эКВ}} < [\sigma],$$

где допустимое напряжение $[\sigma] = \sigma_{-1}/n$; n – коэффициент запаса усталостной прочности. Согласно кривой Велера $\sigma_{\text{эКВ}}$ определяется [1]

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt[m]{\frac{\sum_{i=1}^I \sigma_i^m N_i}{N_0}}, \quad (10)$$

где N_0 – базовое число циклов (количество полных циклов амплитудой σ_{-1} до разрушения образца); I – количество значений амплитуд (классов) в циклограмме; i – номер класса [4] (порядковый номер амплитуды σ_i в циклограмме); N_i – количество циклов, в которых амплитуда нормальных напряжений была σ_i . При этом согласно [1] в выражении (10) учитываются и те циклы, у которых $\sigma_i < \sigma_{-1}$.

В каждый момент времени t главные напряжения действуют в конкретной площадке с направляющим перпендикуляром $\vec{v}(t)$. В остальных площадках в этот момент времени имеют место как нормальные, так и касательные напряжения. В каждой площадке с направляющим перпендикуляром \vec{v} по реализациям $\sigma_p(t)$ достаточно просто построить циклограммы нормальных напряжений и определить критерий усталости

$$G(v) = \sum_{i=1}^I \sigma_i^m N_i.$$

По циклограммам несложно выявить площадку с направляющим перпендикуляром \vec{v}_A , в которой критерий усталости окажется наибольшим (так называемое «опасное сечение»). Таким образом, в опасном сечении имеет место отношение

$$G(v_A) = \max_v G(v).$$

Оценка опасного сечения только по нормальным напряжениям (без учета касательных напряжений) несколько противоречит критерию, описанному в [2]. При этом предложенный в [2] способ построения $\sigma_p(t)$ при помощи выражения (9) можно критиковать по двум причинам:

– $|\vec{\tau}_v(t)|$ не фиксирует направление вектора $\vec{\tau}_v(t)$, поэтому не может учитывать полные циклы касательных напряжений;

– если в течение времени $T_1 \leq t \leq T_2$ в данной площадке действовали только нормальные напряжения, а касательные в это время отсутствовали, то при $1 < \lambda \leq 2$ оказывается, что

$$\sigma_p(T_1 \leq t \leq T_2) < \sigma_v(T_1 \leq t \leq T_2)$$

и, таким образом, циклограммы при одноосном напряженном состоянии строятся по заниженным значениям напряжений.

Поскольку сопротивляемость металла разрушениям нормальными и касательными напряжениями различна, представляет интерес оценка усталостной прочности с использованием условного напряжения, определенного по отличающейся от (9) эмпирической формуле

$$\sigma_{p,2}(t) = \vec{v}' \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x & \lambda\tau_{x,y} & 0 \\ \lambda\tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{v}. \quad (11)$$

Оценим экспериментально погрешности определения $\sigma_{экр}$ по циклограммам, построенным для опасных сечений на основании «осциллограммы» $\sigma_p(t)$ при $\lambda = 1$ и «осциллограммы» $\sigma_{p,2}(t)$.

Все эксперименты проводились с холодно-тянутыми круглыми в поперечном сечении образцами из сталей Ст0-Ст3. Образцы испытывали одновременно циклические изгиб и кручение. Для экспериментов образец одним концом зажимался в поворотное устройство, а вторым концом – в грузило (рис. 4).

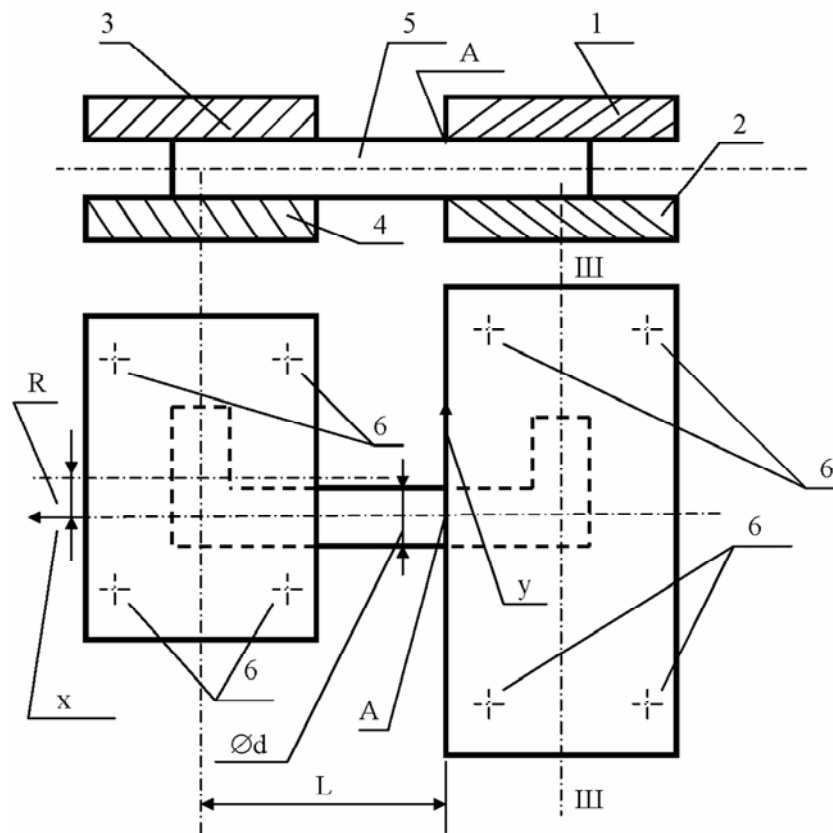


Рис. 4. Схема устройства для исследования усталости деталей, испытывающих совместные циклические изгиб и кручение

Расстояние L от стенок деталей 1 и 2 до продольной оси симметрии грузила 3, 4 является плечом изгибающего момента. Расстояние R от центра масс грузила с зажатой в него частью образца до продольной оси симметрии цилиндрической части образца является плечом крутящего момента. Масса грузила с зажатой в него частью образца – M . Диаметр образца – d . Напряжения, действующие в точке A образца (около поворотного устройства) в положении, соответствующем рис. 4, согласно [8]

$$\sigma_x \approx \frac{32MgL}{d^3}, \quad (12)$$

$$\tau_{x,y} = \frac{16MgR}{d^3} \quad (13)$$

(на рис. 4 ось x расположена вдоль продольной оси образца, ось y – вдоль стенки поворотного устройства). При повороте поворотного устройства относительно горизонтальной оси ШШ на 180° знаки напряжений в точке A

поменяются на противоположные. Таким образом, при повороте поворотного устройства на 360° точка A испытывает полный цикл напряжений (нормальных, обусловленных изгибающим моментом, и касательных, обусловленных крутящим моментом).

При определении условного напряжения по формуле (9) наибольшие нормальные напряжения в положении, соответствующем рис. 4, будут зафиксированы в площадках с направляющим перпендикуляром

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \cos(v, x) \\ \cos(v, y) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{R}{L}. \quad (15)$$

При этом согласно (6) амплитуды полуциклов нормальных напряжений в площадках

$$\begin{aligned} \sigma_v &= Mg \left(\frac{32L}{d^3} \cos^2 \alpha + \frac{16R}{d^3} \sin 2\alpha \right) = \\ &= \frac{32Mg}{d^3} (L \cos \alpha + R \sin \alpha) \cos \alpha = WL_{\text{пр}}, \quad (16) \end{aligned}$$

где

$$W = \frac{32Mg}{d^3},$$

$$L_{\text{пр}} = (L \cos \alpha + R \sin \alpha) \cos \alpha.$$

Выражения (14) и (15) получены из (6), (8) и (16) на основании следующих соображений [9].

$$\begin{aligned} &(\forall_t \sigma_v(t) = \max) \wedge \\ &\wedge (\cos^2(v, x) + \cos^2(v, y) + \cos^2(v, z) = 1) \Rightarrow \\ &\Rightarrow (\cos^2(v, z) = 0) \Rightarrow (\cos^2(v, x) + \cos^2(v, y) = 1) \Rightarrow \\ &\Rightarrow (\cos(v, y) = \sin(v, x)) \quad (17) \end{aligned}$$

и с точностью до обозначения $(v, x) = \alpha$

$$\left(\frac{d\sigma_v}{d\alpha} = 0 \right) \Rightarrow \left(\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{R}{L} \right). \quad (18)$$

Эксперименты проводились с образцами трех типов, изготовленными из холоднотянутой

проволоки разных марок малоуглеродистой стали. Отличались образцы диаметром, маркой стали и условиями изготовления проволоки.

В табл. 1–3 проведено сравнение величин $(L_{\text{пр},j}^m N)$, полученных для различных значений M , L и R . Согласно выражению (16) величина $(L_{\text{пр},j}^m N)$ пропорциональна критерию устойчивости $(\sigma_v^m N)$. Здесь величина $L_{\text{пр},j}$ определяется выражениями

$$L_{\text{пр},1} = \frac{M_k}{M_0} [L \cos \alpha + R \sin \alpha] \cos \alpha, \quad (19)$$

$$L_{\text{пр},2} = \frac{M_k}{M_0} (L \cos \alpha_2 + \lambda R \sin \alpha_2) \cos \alpha_2, \quad (20)$$

где $M_0 = 0,5$ кг – масса одного из грузил; M_k – масса того грузила, с которым экспериментировали в опыте k ; α определяется из выражения (15); N – количество циклов (поворотов поворотного устройства на 360°) до разрушения образца, $m = 4$,

$$\operatorname{tg} 2\alpha_2 = \frac{\lambda R}{L}, \quad (21)$$

согласно рекомендациям [2]

$$\lambda = \frac{1}{0,6} = 1,67.$$

В табл. 2, 3 двойными линиями разделены опыты с различными образцами, изготовленными из проволоки одного типа, но, возможно, разных плавков.

В каждой из табл. 1–3 определим

$$G_{\max,j} = \max_k (L_{\text{пр},j}^m N), \quad G_{\min,j} = \min_k (L_{\text{пр},j}^m N),$$

$$L_{\text{экв},\max,j} = \sqrt[m]{G_{\max,j}}, \quad L_{\text{экв},\min,j} = \sqrt[m]{G_{\min,j}},$$

$$L_{\text{экв},\text{ср},j} = 0,5 (L_{\text{экв},\max,j} + L_{\text{экв},\min,j})$$

и относительную ошибку определения $\sigma_{\text{экв}}$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{экв},j} &= \frac{L_{\text{экв},\text{ср},j} - L_{\text{экв},\min,j}}{L_{\text{экв},\text{ср},j}} = \\ &= \frac{L_{\text{экв},\max,j} - L_{\text{экв},\text{ср},j}}{L_{\text{экв},\text{ср},j}}. \quad (22) \end{aligned}$$

Таблица 1

Серия экспериментов с образцами из отожженной проволоки диаметром 1,7 мм

k	R , мм	L , мм	M_k , кг	N	2α	$L_{пр,1}$, мм	$2\alpha_2$	$L_{пр,2}$, мм	$L_{пр,1}^m N$	$L_{пр,2}^m N$
1	0	60	0,50	29	0°	60	0°	60	$37,6 \cdot 10^7$	$37,6 \cdot 10^7$
2	0	37	0,50	108	0°	37	0°	37	$20,2 \cdot 10^7$	$20,2 \cdot 10^7$
3	0	24	0,50	854	0°	24	0°	24	$28,3 \cdot 10^7$	$28,3 \cdot 10^7$
4	0	52	0,50	67	0°	52	0°	52	$49,0 \cdot 10^7$	$49,0 \cdot 10^7$
5	3	30	0,50	384	5°45'	≈30	9°26'	30,0	$31,1 \cdot 10^7$	$31,1 \cdot 10^7$
6	54	53	0,50	30	45°30'	64,0	59°30'	79,0	$50,3 \cdot 10^7$	$116,9 \cdot 10^7$
7	38	25	0,50	96	56°40'	35,2	68°20'	46,8	$14,7 \cdot 10^7$	$46,0 \cdot 10^7$
8	34	33	0,50	170	46°	40,2	59°30'	49,1	$44,4 \cdot 10^7$	$98,8 \cdot 10^7$
9	30	15	0,50	408	63°30'	23,8	73°20'	34,0	$13,1 \cdot 10^7$	$54,5 \cdot 10^7$
10	10	30 ¹	0,50	452	≈18°	31,0	29°30'	32,0	$41,7 \cdot 10^7$	$47,4 \cdot 10^7$
11	27	20	0,50	214	53°30'	26,9	66°	34,7	$11,2 \cdot 10^7$	$31,0 \cdot 10^7$
12	14	22	0,50	425	32°30'	24,0	46°20'	27,0	$14,1 \cdot 10^7$	$22,6 \cdot 10^7$

Таблица 2

Серия экспериментов с образцами из холоднотянутой проволоки диаметром 1,2 мм

k	R , мм	L , мм	M_k , кг	N	2α	$L_{пр,1}$, мм	$2\alpha_2$	$L_{пр,2}$, мм	$L_{пр,1}^m N$	$L_{пр,2}^m N$
13	0	38	0,50	46	0°	38	0°	38	$95,9 \cdot 10^6$	$95,9 \cdot 10^6$
14	0	30	0,50	151,5	0°	30	0°	30	$122,7 \cdot 10^6$	$122,7 \cdot 10^6$
15	22	17	0,50	109	52°25'	22,5	65°10'	28,7	$27,9 \cdot 10^6$	$74,0 \cdot 10^6$
16	3	28	0,50	47,5	6°	28,2	10°5'	28,2	$30,0 \cdot 10^6$	$30,0 \cdot 10^6$
17	28	15	0,50	119	61°50'	23,4	72°	32,1	$35,7 \cdot 10^6$	$126,3 \cdot 10^6$
18	17	25	0,50	172	56°	26,4	41°20'	31,2	$83,5 \cdot 10^6$	$163,0 \cdot 10^6$
19	47 ²	13	0,50	22	74°30'	27,8	80°35'	46,0	$13,1 \cdot 10^6$	$98,5 \cdot 10^6$
20	0	12	0,50	1731	0°	12	0°	12	$35,9 \cdot 10^6$	$35,9 \cdot 10^6$
21	37 ²	12	0,50	57	72°	25,6	79°	37,2	$24,5 \cdot 10^6$	$109,2 \cdot 10^6$
22	13	14	0,50	226	43°	16,6	57°	19,8	$17,2 \cdot 10^6$	$34,7 \cdot 10^6$
23	18 ³	23	0,50	163	38°	26,2	52°30'	30,5	$76,8 \cdot 10^6$	$141,0 \cdot 10^6$
24	2	36	0,50	68	≈0°	36	5°18'	35,9	$114,2 \cdot 10^6$	$113,0 \cdot 10^6$
25	11	17	0,50	277	32°50'	18,7	47°10'	21,1	$33,9 \cdot 10^6$	$54,9 \cdot 10^6$
26	0	18	0,50	696	0°	18	0°	18	$105,0 \cdot 10^6$	$105,0 \cdot 10^6$
27	20	18	0,35	1175	48°	15,8	61°40'	19,6	$73,2 \cdot 10^6$	$173,4 \cdot 10^6$
28	42	13	0,35	257	72°45'	20,1	79°30'	28,5	$41,9 \cdot 10^6$	$169,6 \cdot 10^6$
29	50	8	0,35	472	80°55'	22,2	84°30'	32,4	$114,6 \cdot 10^6$	$520,1 \cdot 10^6$

Серия экспериментов с образцами из холоднотянутой проволоки диаметром 0,8 мм

k	R , мм	L , мм	M_k , кг	N	2α	$L_{пр,1}$, мм	$2\alpha_2$	$L_{пр,2}$, мм	$L_{пр,1}^m N$	$L_{пр,2}^m N$
30	0	20	0,50	73,5	0°	20	0°	20	11,8·10 ⁶	11,8·10 ⁶
31	10	15	0,50	97	33°40'	16,4	48°	20	7,0·10 ⁶	15,5·10 ⁶
32	18	20	0,50	30	42°	23,6	56°20'	28,2	9,3·10 ⁶	19,0·10 ⁶
33 ⁴	13	13	0,50	224	45°	14,5	59°10'	19,1	11,7·10 ⁶	32,8·10 ⁶
	13	20		8	33°	21,8	42°30'	24,7	4,9·10 ⁶	14,7·10 ⁶
34	25 ³	17	0,50	15,5	≈56°	23,7	66°	31,2	17,1·10 ⁶	92,4·10 ⁶
35	33 ³	12	0,50	55	70°	23,6	77°45'	36	11,9·10 ⁶	11,9·10 ⁶
36	0	18	0,50	26	0°	26	0°	26	1,4·10 ⁶	2,2·10 ⁶
37	10	16	0,50	15	32°	17,4	46°10'	19,6	1,0·10 ⁶	2,5·10 ⁶
38	12	12	0,50	32	45°	13,4	59°	16,8	10,1·10 ⁶	10,1·10 ⁶
39	0	12	0,50	485	0°	12	0°	12	2,1·10 ⁶	8,0·10 ⁶
40	20	10	0,35	131	63°30'	11,3	73°20'	15,7	1,4·10 ⁶	6,7·10 ⁶
41	14	14	0,35	152	45°	9,8	59°	14,5	7,4·10 ⁶	7,4·10 ⁶
42	0	15	0,50	145,5	0°	15,0	0°	15,0	0,5·10 ⁶	1,4·10 ⁶
43	17	12	0,35	27	55°	11,6	67°10'	15	7,5·10 ⁶	7,5·10 ⁶
44 ⁴	0	19	0,50	40	0°	19	0°	19	0,8·10 ⁶	3,3·10 ⁶
	0	23		8	0°	23	0°	23	11,8·10 ⁶	11,8·10 ⁶
45	17	10	0,35	72	59°30'	10,3	70°35'	14,6	7,0·10 ⁶	15,5·10 ⁶
46	0	33	0,50	16	0°	33	0°	33	9,3·10 ⁶	19,0·10 ⁶
47	10	17	0,50	12	30°30'	18,5	44°30'	20,8	11,7·10 ⁶	32,8·10 ⁶
48	2	13	0,50	212	≈0°	≈13	13°	13,3	4,9·10 ⁶	14,7·10 ⁶
49	12	11	0,50	94,5	57°30'	13,5	61°20'	16,9	17,1·10 ⁶	92,4·10 ⁶
50	0	20	0,50	40	0°	20,0	0°	20,0	11,9·10 ⁶	11,9·10 ⁶
51	23	29	0,35	69	38°30'	23,1	53°	27,1	1,4·10 ⁶	2,2·10 ⁶

Примечание для табл. 1–3: 1. Величина L в конце опыта оказалась меньше, чем в начале опыта.

2. С первого же цикла отмечается пластическая деформация образца.

3. После некоторого количества циклов отмечается пластическая деформация образца.

4. Σ – было осуществлено $N_{(1)}$ циклов с нагружением при $R_{(1)}$, $L_{(1)}$ и $N_{(2)}$ циклов с нагружением при $R_{(2)}$, $L_{(2)}$;

таким образом, $L_{пр,j}^m N = L_{пр,j(1)}^m N_{(1)} + L_{пр,j(2)}^m N_{(2)}$.

При $j=1$ и $j=2$ учтем только опыты на изгиб и кручение (чистый изгиб учитывать не будем). Кроме того, в каждой таблице определим величины $G_{\max,0}$, $G_{\min,0}$, $L_{\text{экр},\max,0}$, $L_{\text{экр},\min,0}$, $L_{\text{экр},\text{ср},0}$ и $\varepsilon_{\text{экр},0}$ для опытов с усталостным разрушением образцов чистым изгибом. Для каждой из табл. 1–3 сформируем соответ-

венно табл. 4–6 с величинами $G_{\max,j}$, $G_{\min,j}$, $L_{\text{экр},\max,j}$, $L_{\text{экр},\min,j}$, $L_{\text{экр},\text{ср},j}$ и $\varepsilon_{\text{экр},j}$.

Анализируя табл. 2, можно сказать следующее. Учитывать при обработке опыт $k=19$, по-видимому, нельзя, т. к. реально на образец действовали напряжения, меньшие расчетных. Опыты $k=21$ и $k=23$ придется учитывать,

т. к. на последней стадии перед разрушением неразрушенная часть металла не может сопротивляться изгибу и кручению так же, как и все сечение образца до приложения циклических напряжений. Естественно, 46 (опыт $k = 13$) или даже 696 (опыт $k = 26$) циклов до разрушения не соответствуют понятию многоциклового усталости (что справедливо и для результатов, представленных в табл. 1 и 3).

Таблица 4

Отработка результатов, приведенных в табл. 1

J	0	1	2
$G_{\max, j}$	$49,0 \cdot 10^7$	$50,3 \cdot 10^7$	$116,9 \cdot 10^7$
$G_{\min, j}$	$20,2 \cdot 10^7$	$11,2 \cdot 10^7$	$22,6 \cdot 10^7$
$L_{\text{экр}, \max, j}$	149	150	185
$L_{\text{экр}, \min, j}$	119	103	123
$L_{\text{экр}, \text{ср}, j}$	134	127	154
$\varepsilon_{\text{экр}, j}$	0,112	0,186	0,201

Таблица 5

Отработка результатов, приведенных в табл. 2

j	0	1	2
$G_{\max, j}$	$122,7 \cdot 10^6$	$114,6 \cdot 10^6$	$520,1 \cdot 10^6$
$G_{\min, j}$	$30,0 \cdot 10^6$	$17,2 \cdot 10^6$	$34,7 \cdot 10^6$
$L_{\text{экр}, \max, j}$	105	103	151
$L_{\text{экр}, \min, j}$	74	64	77
$L_{\text{экр}, \text{ср}, j}$	90	84	114
$\varepsilon_{\text{экр}, j}$	0,173	0,234	0,324

Таблица 6

Отработка результатов, приведенных в табл. 3

J	0	1	2
$G_{\max, j}$	$19,0 \cdot 10^6$	$19,6 \cdot 10^6$	$92,4 \cdot 10^6$ ($32,8 \cdot 10^6$)
$G_{\min, j}$	$6,4 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$
$L_{\text{экр}, \max, j}$	66,0	66,5	98,0 (75,7)
$L_{\text{экр}, \min, j}$	50,3	26,6	34,4
$L_{\text{экр}, \text{ср}, j}$	58,1	46,6	66,2 (55,1)
$\varepsilon_{\text{экр}, j}$	0,135	0,430	0,480 (0,375)

Примечание. В скобках приведены результаты для второго по величине значения $G_{\max, 2}$.

При формировании табл. 6, как и при обработке табл. 2, результаты опытов $k = 34$ и $k = 35$ придется учитывать.

Как видно из табл. 4, $L_{\text{экр}, \max, 2} > L_{\text{экр}, \max, 0}$ и $L_{\text{экр}, \max, 1} > L_{\text{экр}, \max, 0}$; $L_{\text{экр}, \min, 2} > L_{\text{экр}, \min, 0}$ в то время, как $L_{\text{экр}, \min, 1} < L_{\text{экр}, \min, 0}$.

Как видно из табл. 5, $L_{\text{экр}, \max, 2} > L_{\text{экр}, \max, 0}$ в то время, как $L_{\text{экр}, \max, 1} < L_{\text{экр}, \max, 0}$; $L_{\text{экр}, \min, 2} > L_{\text{экр}, \min, 0}$ в то время, как $L_{\text{экр}, \min, 1} < L_{\text{экр}, \min, 0}$.

Как видно из табл. 6, $L_{\text{экр}, \max, 2} > L_{\text{экр}, \max, 0}$ и $L_{\text{экр}, \max, 1} > L_{\text{экр}, \max, 0}$; $L_{\text{экр}, \min, 2} < L_{\text{экр}, \min, 0}$ и $L_{\text{экр}, \min, 1} < L_{\text{экр}, \min, 0}$, но $L_{\text{экр}, \min, 2} > L_{\text{экр}, \min, 1}$.

Судя по результатам, приведенным в табл. 4–6, относительная ошибка $\varepsilon_{\text{экр}}$ определения $\sigma_{\text{экр}}$ при циклическом изгибе меньше, чем при совместных циклических изгибе и кручении. Возможно, это связано с неудачным выбором величины m .

Интересно (и это не противоречит [10]), что, если определять критерий усталости по нормальным напряжениям (согласно выражению (9) при $\lambda = 1$), то иногда при циклическом изгибно-крутильном нагружении образец ломается при величинах ($L_{\text{пр}, 1}^m N$), значительно меньших, чем при чистом циклическом изгибе (см., например, опыты $k = 7$, $k = 9$, $k = 11$, $k = 15$, $k = 19$, $k = 37$, $k = 38$ в табл. 1–3).

При определении критерия усталости согласно выражению (11) случаев, когда при циклическом изгибно-крутильном нагружении образец ломается при величинах ($L_{\text{пр}, 2}^m N$), значительно меньших, чем при чистом циклическом изгибе, практически не бывает.

Выводы

1. Как следует из табл. 4–6, определение циклограмм нормальных напряжений и опасных сечений, используя зависимость (9) при $\lambda = 1$, а затем определение по этим циклограммам величины $\sigma_{\text{экр}}$ может привести к ошибке, которая в запас усталостной прочности не идет.

2. Почти всегда «в запас» усталостную прочность детали можно определять, рассчитывая условное напряжение по формуле (11).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – 101 с.

2. А. С. Гусев. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
3. Когаев В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
4. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
5. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. - 319 с.
6. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
7. Справочник машиностроителя. Т. 1. / Под ред. Е. А. Чудакова. – М.: Гос. науч. тех. издат. машиностроительной литературы, 1951. – 1036 с.
8. Справочник машиностроителя. Т. 3. / Под ред. Е. А. Чудакова. – М.: Гос. науч. тех. издат. машиностроительной литературы, 1951. – 1098 с.
9. Фор Р. Современная математика / Р. Фор, А. Кофман, М. Дени-Папен. – М.: Мир, 1966. – 272 с.
10. Романив О. Н. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие. Том 4. Усталостная и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.

Поступила в редколлегию 09.02.2006.