

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Ո. Վ. ՕԼԻՆԻԿ, Վ. Վ. ԲԵՅԵՐ, Մ. Դ. ՏԱԿՅԱՆ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УПРОЧНЕНИЯ
 ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ

В связи с интенсивным развитием машиностроения всю большую актуальность приобретают вопросы уменьшения металлоемкости машин за счет совершенствования методов расчета, проектирования и технологии изготовления деталей машин, а также применения термического и механического упрочнения. Отыскание дополнительных резервов прочности и долговечности деталей машин базируется на точном учете их эксплуатационных нагрузок, статистической оценке характеристик выносливости и применении в практике конструирования термообработанных до высокой твердости среднеуглеродистых и низколегированных сталей. Поэтому представляет определенный интерес изучение эффекта упрочнения, достигаемого при использовании того или иного вида термической обработки.

Влияние методов упрочнения на выносливость сталей обычно учитывается коэффициентом

$$\beta_s = \frac{\sigma_r}{\sigma_s} \quad (1)$$

где σ_r , σ_s — пределы длительной или ограниченной выносливости упрочненных и неупрочненных деталей машин.

Если вероятностные значения пределов выносливости представить в виде

$$\sigma_{rs} = \bar{\sigma}_r + uS_s = (1 + uV_s) \bar{\sigma}_r \quad (2)$$

то получим, что

$$\beta_s = \frac{(1 + uV_s) \bar{\sigma}_r}{(1 + uV_s') \bar{\sigma}_s} = A_n \beta_r \quad (3)$$

где u — квантиль нормального распределения;

$\bar{\beta}_r$, $\bar{\sigma}_r$, $\bar{\sigma}_s$ — средневероятностные значения β_r , σ_r , σ_s ;

V_s , V_s' — коэффициенты вариации σ_{rs} , σ_{rs}' ;

A_n — вероятностный коэффициент.

Значения $\bar{\sigma}_{rs}$, $\bar{\sigma}_s$ и их дисперсии S_s^2 зависят от требуемой долго-

вечности (наработки) N , равно как и размеры полей рассеяния долговечностей N зависят от уровня напряжения σ_r . У металлов с различными структурными состояниями, а значит и деталей из них, поля рассеяния этих величин неодинаковы, поэтому в общем случае $V_1 \neq V_2$ и A_1 отличны от единицы. Следовательно, величина β будет зависеть от числа циклов N и вероятности неразрушения $I(N)$. Можно считать, что значения β , приводимые в справочной литературе, фактически соответствуют уровню $IN \approx 50\%$ в области длительной выносливости.

Для оценки коэффициента β , во всем реальном интервале A применим ранее предложенную методику [1, 2], основанную на использовании уравнения кривой выносливости в параметрическом виде:

$$\lg N_i = -(\bar{m} + uS_m)(\lg z_i - \lg \bar{z}) + (\lg N + uS_N) \quad (4)$$

$$\text{или} \quad \lg N_i = C_n - m_n \lg z_i, \quad (4a)$$

$$\text{где} \quad C = (\bar{m} + uS_m)\lg \bar{z} + (\lg N + uS_N); \quad m_n = (\bar{m} + uS_m). \quad (4б)$$

В статье рассматриваются результаты циклических испытаний (чистый изгиб с вращением) образцов из стали 45 и 40 (гладкие (Г.) и с концентраторами напряжений (К) $d = 10; 25$ мм, $r_1 = 2, 51$ и $1, 85$), подвергнутых отжигу (О), нормализации (Н), улучшению (У) и закалке (З). Режимы нагружения — стационарный и программный с варьированием амплитуды изгибных напряжений между двумя уровнями [3, 4].

В расчетах приняты следующие допущения:

а) средневероятные кривые выносливости при закалке доведены до $N_0 = 10^8$ для гладких и $N_0 = 0,5 \cdot 10^8$ для надрезанных образцов (в литературе доказывается возможность такой экстраполяции; в связи с незначительным наклоном кривых выносливости значения z_r, z_{rn} отличаются от таковых при $N_0 = 5 \cdot 10^7$, примерно на 10%);

б) кривые выносливости, удовлетворяющие определенной $I(N)$, переходят к горизонтальному участку при разных N_0 согласно схеме рис. 1,а. Для определения координат точек перегибов кривых выносливости, соответствующих разным $I(N)$, найдем уравнение дополнительной прямой

$$\lg z_1 = \bar{m} \lg N_i - \lg \Delta z, \quad \text{где} \quad \lg \Delta z = \bar{m} \lg N_0 - \lg \bar{z}. \quad (5)$$

Решая совместно (4a) и (5), получим:

$$\lg N_{0i} = \frac{C_n + \lg \Delta z}{\bar{m} + \frac{1}{m_n}}; \quad \lg z_{r0} = \frac{C_n - \frac{\lg \Delta z}{\bar{m}}}{m_n - \frac{1}{m}}. \quad (6)$$

В связи с разным расположением составляемых кривых выносливости наметим зоны долговечностей, в пределах которых вид

зависимости $\beta_2 = f[N; l(\lambda)]$ остается неизменным (см. рис. 1, б, на котором параметры кривой для отожженных образцов снабжены штрихами).

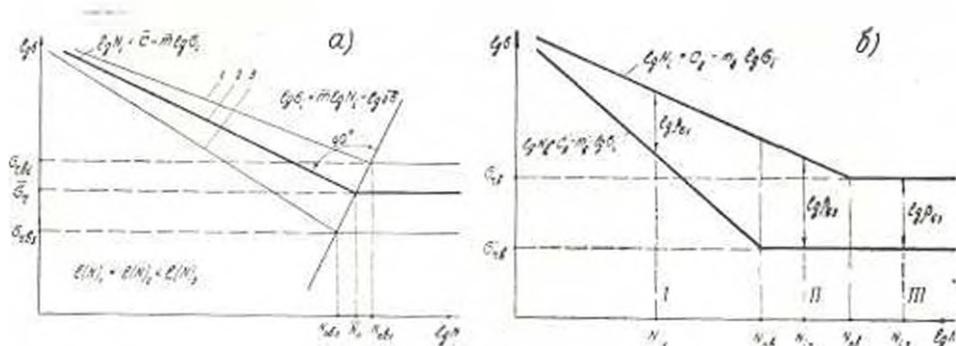


Рис. 1. а) к определению области рассеяния β_{2n} . б) к определению зависимостей (7)–(10).

I зона — $N_1 < N_{0n}$. При $N_{11} = \text{const}$ $\lg \beta_{21} = \lg \alpha_1 = \lg \alpha_1'$,

$$\text{где } \lg \alpha_1 = \frac{C_n - m_n \lg N_{11}}{m_n}; \quad \lg \alpha_1' = \frac{C_n - m_n' \lg N_{11}}{m_n'}$$

Для данного интервала

$$\lg \beta_2 = \left| \frac{C_n}{m_n} - \frac{C_n'}{m_n'} \right| + \left| \frac{1}{m_n} - \frac{1}{m_n'} \right| \lg N_1 \quad (7)$$

$$\text{или } \lg \beta_2 = S_1 + M_1 \lg N_1 \quad (7a)$$

II зона — $N_{0n} < N_1 < N_{0n}$. При $N_{12} = \text{const}$ $\lg \alpha_1 = \text{const} = \frac{C_n}{m_n} - \frac{1}{m_n} \lg N_{0n}$,

$$\text{поэтому } \lg \beta_2 = \left| \left(\frac{C_n}{m_n} - \frac{C_n'}{m_n'} \right) + \frac{1}{m_n} \lg N_{0n} \right| - \frac{1}{m_n} \lg N_1 \quad (8)$$

$$\text{Если } N_{0n} > N_{0n}, \text{ то } \lg \beta_2 = \left| \left(\frac{C_n}{m_n} - \frac{C_n'}{m_n'} \right) - \frac{1}{m_n} \lg N_{0n} \right| + \frac{1}{m_n} \lg N_1 \quad (9)$$

$$\text{Для II зоны } \lg \beta_2 = S_2 + M_2 \lg N_1 \quad (9a)$$

III зона — $N_1 > N_{0n}$. При $N_{13} = \text{const}$ $\lg \alpha_1' = \text{const}$, $\lg \alpha_1 = \text{const} =$

$$= \frac{C_n}{m_n} - \frac{1}{m_n} \lg N_{0n}$$

тогда

$$\lg \beta_2 = \left| \frac{C_n}{m_n} - \frac{C_n'}{m_n'} \right| + \left| \frac{\lg N_{0n}}{m_n} - \frac{\lg N_{0n}}{m_n} \right| \quad (10)$$

или

$$\lg \beta_2 = S_3 + M_3 - \text{const} \quad (10a)$$

На рис. 2 представлены зависимости (7)–(10) при разных видах термической обработки. При низких и умеренных твердостях в связи с незначительным упрочнением во всем интервале долговечностей $\beta_2 \approx \text{const}$, а для нормализации — $\beta_2 \approx 1$. С переходом к неравновесным структурным состояниям значения, дисперсия и интенсивность изменения коэффициента β_2 возрастают. Заметное влияние на величину β_2 оказывают также размеры и конструктивные формы образцов. Вид функции $\beta_2 = f(N)$ при этом определяется соотношениями параметров и абсцисс точек перегибов кривых выносливости отожженных

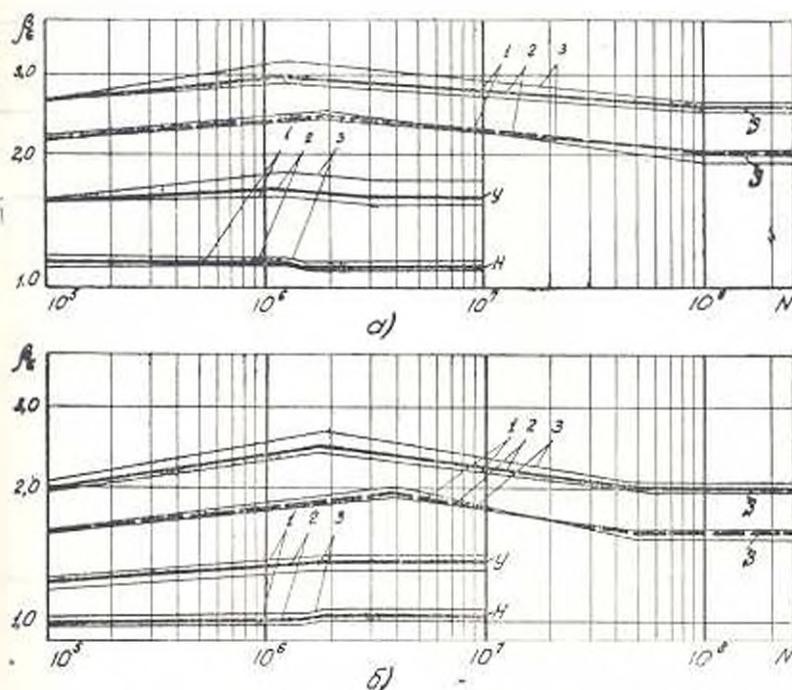


Рис. 2. Изменение коэффициента β_2 в зависимости от N и $k(N)$:
 а) стационарное нагружение—образцы из стали 45, \odot 10Гл и из стали 40X, \ominus 25Гл;
 б) программное нагружение—образцы из стали 45, \odot 25К и из стали 40X, \ominus 25К.
 Пунктирные линии относятся к образцам из стали 40X. Линии 1, 2, 3 соответствуют $k(N) = 10, 50$ и $99,9\%$.

и термообработанных образцов. В табл. 1 представлены возможные варианты кривых $\beta_2 = f(N)$ в зависимости от указанных величин, а в табл. 2 — их относительные изменения. В табл. 1 и 2 приняты обозначения: $\delta N_0 = \frac{\lg N_{02}}{\lg N_{01}}$, $\delta m_n = \frac{m_{n2}}{m_{n1}}$, $\delta C_n = \frac{C_{n2}}{C_{n1}}$; откуда получим, что $\delta \beta_0 = \frac{\delta C_n}{\delta m_n}$, где $\delta C_n = \frac{C_n}{C_0}$.

Значения δN_n предопределяют размеры зон изменения коэффициента β . В широком интервале $I(N)$ с увеличением твердости образцов значения δN_n возрастают, и вид функции $\beta_s = f(N)$ сохраняется во всех трех зонах. Программное нагружение не оказывает существенного влияния на δN_n и только при наличии надрезов и для крупных образцов рост δN_n несколько замедляется. При умеренной твердости возможны некоторые отклонения от этой закономерности, а при нормализации зачастую $\delta N_n \leq 1$.

Таблица 1

№	δN_s	δm_s	$\delta \sigma$	Вид зависимости $\beta_s = f(N)$
1	$\delta N_s > 1$	$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma > 1$	
2		$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma < 1$	
3	$\delta N_s < 1$	$\delta m_s = 1$	$\delta \sigma > 1$	
4		$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma > 1$	
5		$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma < 1$	
6	$\delta N_s < 1$	$\delta m_s = 1$	$\delta \sigma > 1$	
7		$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma > 1$	
8		$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma < 1$	
9	$\delta N_s < 1$	$\delta m_s = 1$	$\delta \sigma > 1$	
10		$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma > 1$	

Протяженность зоны I зависит от N_{0n} и она для всех образцов меняется в незначительной степени, тогда как размеры зоны II обусловлены видом термообработки—они значительны при закалке, минимальны при нормализации, а при $\delta N_n \approx 1$ зона II отсутствует. Начало зоны III зависит от вида термообработки и конструктивных форм образцов. При отсутствии физического предела выносливости ее отчет берется от принятого базового числа циклов. В пределах зоны I формируются значения β , а в конце этой зоны в большинстве $\beta_s \approx \beta_{\text{границ}}$. Зона II оказывает существенное влияние на β только при

высоких твердостях, а зона III характеризует окончательный эффект упрочнения в области длительной выносливости.

Таблица 2

№ по порядку	Конструкция образцов	Режимы	Отношение параметров	$I(N) - 10\%$				$I(N) - 50\%$				$I(N) - 99,9\%$			
				Сталь 45		40X		Сталь 45		40X		Сталь 45		40X	
				II	У	З	З	II	У	З	З	II	У	З	З
1	10Г3	стационарный	σ_{N_0}	1,014	1,070	1,312	—	1,014	1,070	1,312	—	1,014	1,071	1,313	—
			σ_{m_0}	0,854	1,445	2,058	—	0,927	1,559	2,136	—	1,282	2,121	2,516	—
			σ_b	1,045	1,033	1,094	—	1,032	1,018	1,078	—	0,965	0,947	1,000	—
		программный	σ_{N_0}	1,008	1,088	1,311	—	1,008	1,088	1,312	—	1,008	1,089	1,313	—
			σ_{m_0}	0,876	1,522	2,201	—	0,972	1,726	2,453	—	1,327	2,478	3,381	—
			σ_b	1,040	1,030	1,085	—	1,026	1,011	1,065	—	0,970	0,944	0,994	—
2	25 Гз	стационарный	σ_{N_0}	0,983	1,013	1,261	1,276	0,983	1,013	1,261	1,276	0,983	1,011	1,262	1,277
			σ_{m_0}	1,105	1,600	2,190	2,085	1,099	1,573	2,108	1,989	1,086	1,510	1,921	1,769
			σ_b	0,992	0,989	1,040	1,036	0,991	0,987	1,037	1,035	0,989	0,985	1,033	1,036
		программный	σ_{N_0}	1,025	1,040	1,285	1,236	1,025	1,040	1,286	1,230	1,025	1,040	1,286	1,236
			σ_{m_0}	1,343	1,766	2,438	2,178	1,342	1,739	2,386	2,120	1,311	1,680	2,271	1,991
			σ_b	0,966	0,978	1,021	1,032	0,964	0,976	1,018	1,029	0,961	0,973	1,011	1,024
3	10 К	стационарный	σ_{N_0}	0,982	0,962	1,177	—	0,981	0,982	1,178	—	0,980	0,963	1,179	—
			σ_{m_0}	0,953	1,428	2,047	—	0,910	1,400	1,962	—	0,767	1,309	1,678	—
			σ_b	1,020	0,939	0,967	—	1,036	0,937	0,964	—	1,110	0,935	0,965	—
		программный	σ_{N_0}	0,990	0,985	1,180	—	0,993	0,988	1,184	—	1,001	0,999	1,198	—
			σ_{m_0}	0,961	1,445	2,095	—	0,947	1,452	2,057	—	0,897	1,444	1,920	—
			σ_b	0,985	0,912	0,936	—	1,023	0,938	0,960	—	1,178	1,033	1,059	—
4	25 К	стационарный	σ_{N_0}	1,006	1,004	1,221	1,183	1,005	1,004	1,221	1,184	1,005	1,004	1,222	1,185
			σ_{m_0}	0,995	1,341	2,130	1,793	0,973	1,325	2,055	1,742	0,906	1,277	1,829	1,580
			σ_b	1,005	0,983	0,987	0,972	1,009	0,982	0,986	0,971	1,025	0,978	0,987	0,971
		программный	σ_{N_0}	0,989	0,997	1,226	1,100	0,989	0,997	1,226	1,170	0,989	0,998	1,228	1,171
			σ_{m_0}	1,066	1,368	2,220	1,752	1,067	1,358	2,197	1,716	1,071	1,327	2,125	1,601
			σ_b	0,985	0,975	0,983	0,977	0,984	0,971	0,977	0,974	0,978	0,955	0,960	0,967

В связи с особенностями изменения δN_0 возможны три группы вариантов зависимости $\beta_0 = f(N)$ (табл. 1).

Если отношение δN_0 формирует вид кривой $\beta_0 = f(N)$ в целом, то от изменения δm_{01} , δC_0 и δ_0 зависят значения параметров S и M или изменение β_0 внутри каждой зоны. Значения параметра M_1 , обуславливающего интенсивность изменения β_0 , с увеличением твердости HRC растут и они максимальны при закалке (рис. 3, а). Знак M_1 , следовательно и наклон кривой $\beta_0 = f(N)$, зависит от δm_{01} : $M_1 > 0$, когда $\delta m_{01} > 1$ и $M_1 < 0$ при $\delta m_{01} < 1$. Заметное влияние на величину M_1 оказывают концентрация напряжений и размеры образцов. Представим его в виде $M_1 = \frac{\delta m_{01} - 1}{m_{01}}$; согласно табл. 2 $\delta m_{01} \gg \delta m_{01\text{min}}$, а неравенство $m_{01} > m_{01\text{min}}$ наблюдается во всех случаях, поэтому с увеличением диаметров и усилением концентрации напряжений значения M_1 растут. Можно выделить следующие усредненные интервальные значения M_1 при $l(N) = 50\%$: для нормализации $\bar{M}_1 = -0,013 \div 0,016$,

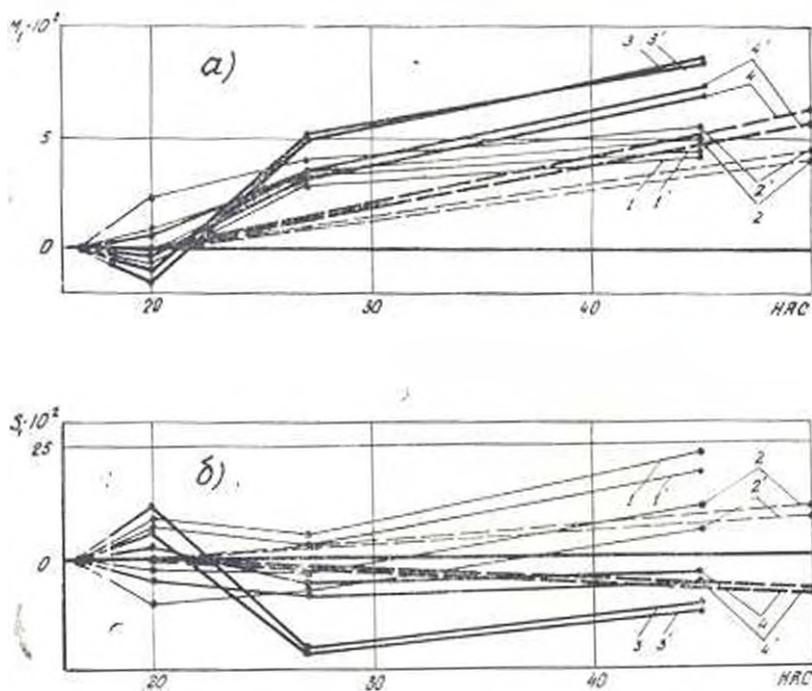


Рис. 3. Изменение параметров M_1 и S_1 в зависимости от HRC при $l(N) = 50\%$: а) $M_1 = f_1(HRC)$; б) $S_1 = f_2(HRC)$.

1 — 10ГЛ; 2 — 225ГЛ; 3 — 10К; 4 — 25К.

(Пунктирные линии относятся к образцам из стали 40X, а цифры со штрихом — программному нагружению.)

для улучшения $\bar{M}_1 = 0,029 \div 0,051$ и для закалки $\bar{M}_1 = 0,043 \div 0,085$. Влияние режима на величину M_1 существенно при высоких твердостях и уровне $l(N)$. Под действием программного нагружения обыч-

но происходит значительный рост с. к. о. показателей наклона S_m для гладких образцов и $S_{mг} > S_{mк}$. Это приводит к сокращению разрыва между $m_{гк}$ и $m_{кк}$ при $I(N) = 99,9\%$, тогда как $\delta m_{гк}$ и $\delta m_{кк}$ при этом почти не меняются. В связи с этим значения M_1 растут, и это заметно при действии программного нагружения.

Аналогично M_1 , значения параметра S_1 , обуславливающего начальный уровень изменения ξ_1 , с увеличением HRC и тенденцией растут (рис. 3, б). Как видно из выражений (4а), (4б) и (7), S_1 зависит от большого количества характеристик выносливости n , в конечном счете, от C_n и M_n . Особенности изменения этих характеристик таковы, что в большинстве $\delta C_n > 1$ и $\delta m_n > 1$, и с увеличением HRC эти значения растут. Для гладких образцов наблюдается условие $\delta C_{гк} > \delta m_{кк}$, следовательно $\delta b_1 > 1$ и $S_1 > 0$. С увеличением диаметров n и при наличии надрезов $\delta C_{кк} < \delta m_{кк}$, т. е. $\delta b_1 < 1$ и $S_1 < 0$. Усредненные интервальные значения S_1 : при нормализации $\bar{S}_1 = -0,036 \pm 0,443$, при улучшении $\bar{S}_1 = -0,207 \pm 0,043$ и при закалке $\bar{S}_1 = -0,120 \pm 0,207$. Следует отметить, что высокой интенсивности изменения ξ_1 всегда соответствует его низкий начальный уровень и наоборот. При $I(N) = 99,9\%$ влияние режима нагружения усиливается, под действием которого значения S_1 падают.

В пределах II зоны кривая $\xi_1 = f(N)$ является спадающей, так как в большинстве $N_{0и} > N'_{0и}$. Для нормализованных и улучшенных образцов, благодаря меньшим размерам зоны II ($\delta N_{0и} \approx 1$) и низкому наклону кривой, значения ξ_1 не претерпевают существенного изменения и в этом случае $\xi_1 \approx \xi_{0и}$. Для закаленных образцов, характеристики выносливости которых значительно выше таковых при отжиге ($\delta N_{0и}$, δm_n , $\delta C_n > 1$), в зоне II изменение ξ_1 существенно, и, в связи с ее большой протяженностью, значения ξ_1 при длительной выносливости сжимаются до своих первоначальных величин при $N = 10^9$. Поэтому в табл. 3 представлены лишь значения параметра S_2 , M_2 при закалке.

Из рассмотрения данных табл. 3 видно, что за исключением знака M_2 , закономерности изменения параметров S_2 , M_2 в связи с размерами и формой образцов, а также действием программного нагружения при разных уровнях $I(N)$ аналогичны S_1 и M_1 .

Учитывая действие рассмотренных факторов на эффект упрочнения в целом, можно сделать вывод, что разнообразие значений S , M и, следовательно, видов функции $\xi_1 = f(N)$ свойственно режиму нормализации. Чаще всего для гладких нормализованных образцов встречаются 4 и 10-й варианты функции (табл. 1), а для надрезанных образцов — 6 и 7-й. Для гладких улучшенных образцов свойственен 2-й вариант функции, а для надрезанных — 5-й. Для закаленных образцов вид функции единственный — 1-й.

Предложенная методика позволяет дифференцированно определить степень упрочнения деталей в зависимости от их термообработки, конст-

Таблица 3

№ по пор.	Режимы	Хонетру- ция обра- цов	Материал	$I(N) = 10\%$		$I(N) = 50\%$		$I(N) = 99,9\%$	
				S_2	M_2	S_1	M_1	S_1	M_2
1	Стандартный	10Гл	Сталь 45	0,6574	-0,0321	0,6986	-0,0363	0,8388	-0,0534
2		25Гл	Сталь 45	0,6654	-0,0395	0,7007	-0,0442	0,8220	-0,0620
3		25Гл	Сталь 40X	0,6368	-0,0407	0,6752	-0,0458	0,8094	-0,0662
4		10К	Сталь 45	0,9174	-0,0787	1,0266	-0,0892	1,3178	-0,1316
5		25К	Сталь 45	0,7664	-0,0599	0,8110	-0,0658	0,9534	-0,0836
6		25К	Сталь 40X	0,7913	-0,0752	0,8514	-0,0832	1,0530	-0,1119
7	Центрированный	10Гл	Сталь 45	0,6114	-0,0275	0,6381	-0,0301	0,7820	-0,0388
8		25Гл	Сталь 45	0,6145	-0,0364	0,6447	-0,0399	0,7427	-0,0520
9		25Гл	Сталь 40X	0,5935	-0,0355	0,6222	-0,0390	0,7163	-0,0517
10		10К	Сталь 45	0,7507	-0,0706	0,9314	-0,0793	1,5802	-0,1134
11		25К	Сталь 45	0,7307	-0,0561	0,7713	-0,0610	0,9025	-0,0772
12		25К	Сталь 40X	0,7448	-0,0706	0,7965	-0,0777	0,9692	-0,1024

руктивных и эксплуатационных факторов. Благодаря более строгому учету этих факторов, в расчетах представляется полностью использовать прочностные резервы деталей машин и добиться снижения их массы для заданной вероятности безотказной работы.

Ե. Վ. ՕԼԵՅՆԻԿ, Վ. Վ. ԲԵԶԵՐ, Մ. Կ. ՈՍԿԿՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՄԵՇԱԿԱՆ ՓՈԳՊԱՏՆԵՐԻ ԱՄՐԱԿՄԱՆ ԷՖԵԿՏԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա. Մ. Փ Ո Ւ Մ Ո Ւ Մ

Հույզ է արված, որ ջերմամշակված պողպատների ամրացման β_0 գործակիցը փոփոխադրական մեծություն է և կախված է ցիկլերի N թվից ու ընթացքի $I(N)$ համեմատականությամբ: Կախված կլման և ջերմամշակված փորձանմուշների դիֆուզիանությամբ կորերի փոխադարձ դատափորությունից, նշված են β_1 գործակիցի փոփոխման դոնանները և ստացված են $\beta_1 = f[N; I(N)]$ կախումները այդ դոնաններից յուրաքանչյուրի համար:

Դիտված է $\beta_1 = f[N; I(N)]$ կորի պարամետրների վրա ջերմամշակման տեսակի, բեռնվածություն սեմիի, փորձանմուշների կոնստրուկտիվ ձևերի ու չափերի ազդեցությունը:

ԼԻՏԵՐԱՏՄՐԱ

1. Потеряев Д. М., Олейник Н. В. «Вестник машиностроения», № 10, 1961.
2. Славян М. Г., Гаспарян С. А., Мак С. Л. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVI, № 4, 1973.
3. Олейник Н. В., Бездер В. В. Выносливость термически обработанных сталей Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 9, Киев, 1969.
4. Олейник Н. В., Бездер В. В. Сопротивление термически обработанных сталей перегрузкам, Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 9.