

М. Г. СТАКЯН, Н. А. ГАЛЕЧЯН

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ ВАЛОВ

С целью диагностирования причин усталостного разрушения произведены массовые измерения микротвердостей на диаметральной сечении изломов образцов из стали 45 с концентраторами напряжений, подвергнутых усталостному разрушению при разных уровнях циклических перенапряжений. Результаты эксперимента обработаны методами корреляционного и регрессионного анализа. Выявлены функции изменения микротвердостей по глубине и диаметральному сечению излома от характеристик сопротивления усталости, что позволило построить номограмму и с ее помощью произвести количественную оценку влияния повреждающих факторов и тем самым воссоздать предысторию усталостного разрушения.

Ключевые слова: микротвердость, усталостное разрушение, диагностирование, номограмма.

В [1-3] для исследования процесса усталостного разрушения валов изучено рассеяние микротвердостей HV в поверхностных слоях изломов образцов с концентраторами напряжений из стали 45 при разных уровнях перенапряжений ($n=12$, по 3 образца на уровнях: $\sigma_i=180, 220, 260$ и 300 МПа) в зонах вязкого и хрупкого разрушений (изготовлено 12 микрошлифов и произведено 3890 измерений HV от поверхности излома до глубины $0,9...1,2$ мм). Однако для диагностирования самого процесса необходимо иметь достоверные данные о существующих связях между параметрами периодического нагружения и значениями микротвердостей по зонам разрушения. В [2] показано, что поверхность HV – d_x – h (d_x – размер диаметрального сечения излома, h – расстояние от поверхности излома) не только отражает качественные изменения, происходящие в тонком поверхностном слое излома, но и может стать основой для разработки новой методики по диагностике причин усталостного разрушения.

С целью выявления связи $F(HV, d_x, h)=0$ результаты массовых измерений HV обработаны согласно программе [4], в которой уравнение семейства квантильных линий регрессии, удовлетворяющих разной вероятности неразрушения, в общем виде записано как

$$y_x = (\bar{y} + z_p s_{y/x}) + (\bar{x} - x) r s_y / s_x = a_y + b_{y/x} x, \quad (1)$$

а мера индивидуального рассеяния вокруг медианной линии регрессии:

$$s_{y/x} = s_y \sqrt{(1 - r^2)(n - 1) / (n - 2)}, \quad (2)$$

где y_x – HV; x – параметр исследуемого фактора; $a_y = (\bar{y} + z_p s_{y/x}) - \bar{x} b_{y/x}$, $b_{y/x} = r s_y / s_x$ – параметр и коэффициент линии регрессии (1); z_p – квантиль нормального распределения, а остальные величины общеизвестны.

Для установления оптимальной формы связи $HV=f_1(h)$, которая заранее неизвестна, согласно [4] необходимо сделать выбор альтернативных вариантов линеаризующих функций, обеспечивающих максимальное значение выборочного коэффициента корреляции $I_{\max}$, и независимо от $I_{\max}$ $I > 0,5$ из пакета функций выбрать связь, которая была бы удобной для оценки исследуемых расчетных величин в целесообразной и доступной новой координатной системе (u, v) . Для разных уровней перенапряжений σ_1 составлены 10 вариантов альтернативных линеаризующих функций и соответствующие им значения $I_{\max}$ I (табл. 1), согласно которым связь $HV = f_1(h)$ образцов в оптимальной форме можно представить в виде функции $HV = a + b_{HV/h} h^{-n}$ ($n = 1...3$, рис.1).

Таблица 1

Линеаризующие преобразования для связи $HV=f_1(h)$ ($\sigma_1=300$ МПа, $N_1=0,53 \cdot 10^5$)

N	U = f(v)	Значения $I_{\max}$ I по рядам измерений HV						
		1.03	1.05	1.07	1.09	1.10	1.19	1.26
1	$y-1/x^n, n=1$	0,9638	0,9813	0,9918	0,9942	0,9712	0,9906	0,9984
2	$\lg(y)-1/x^n, n=2$	0,9470	0,9474	0,9869	0,9892	0,9481	0,9827	0,9927
3	$1/y^n-\lg(x), n=1$	0,8492	0,9524	0,9363	0,9455	0,9599	0,9427	0,9358
4	$1/y-1/x$	0,9186	0,9001	0,9641	0,9696	0,9193	0,9694	0,9850
5	$\lg(y)-\lg(x+g), g=0,2$	0,9102	0,9578	0,9548	0,9506	0,9601	0,9671	0,9182
6	$\lg(y+g)-\lg(x), g=0$	0,8506	0,9370	0,9081	0,9007	0,9412	0,9289	0,8387
7	$y^n-\lg(x), n=3$	0,8384	0,8571	0,8538	0,8485	0,9163	0,9091	0,7804
8	$1/y^n-x, n=1$	0,6553	0,8840	0,7802	0,7593	0,8311	0,7857	0,7779
9	$1/y-1/\exp(x)$	0,7000	0,8181	0,7497	0,7064	0,7751	0,7629	0,6784
10	$1/y-\exp(x)$	0,5785	0,6683	0,6111	0,5730	0,6539	0,6684	0,5729

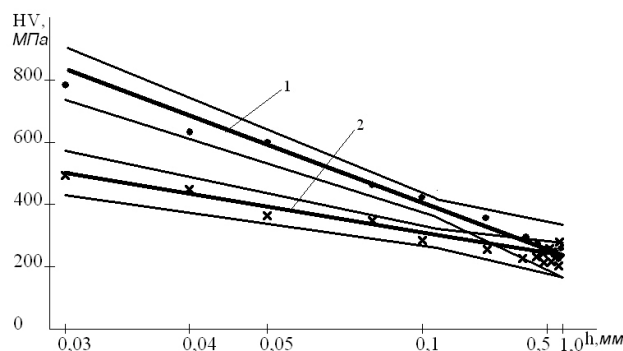


Рис. 1. Медианные линии регрессии $HV=f_1(h)$ и их 90%-ые доверительные границы в системе координат $(y-1/x)$ по зонам вязкого (1) и хрупкого (2) разрушений ($\sigma_1=300$ МПа, $N_1=0,53 \cdot 10^5$)

Изменение HV по глубине носит гиперболический характер и имеет высокий градиент, в связи с чем на расстоянии 0,5...0,8 мм практически устанавливается исходное состояние, что подтверждается также металлографическими исследованиями фазовых составляющих микроструктуры [1].

Расчеты свидетельствуют, что в (1) параметр a_y учитывает уровень, а коэффициент $b_{y/x}$ — градиент упрочняющих процессов. Значения

этих величин претерпевают изменения в зонах вязкого и хрупкого разрушений, а также при переходе к низким уровням σ_i и поэтому могут стать надежными характеристиками для диагностики причин усталостного разрушения.

В диаметральной сечении образцов по оси d_x изменение микротвердостей носит сложный характер (рис.2). Максимальные значения функции $HV = f_2(d_x)$ соответствуют крайним участкам зоны вязкого разрушения, а минимальные - центру зоны хрупкого разрушения. Здесь также с удалением от поверхности излома кривые $HV=f_2(d_x)$ становятся пологими, и на расстоянии $h=0,5...0,8$ мм:

$$HV = f_2(d_x) = \text{const} = HV_0. \quad (3)$$

При снижении значений σ_i , в связи с нецентральной расположением зоны долома и увеличением эксцентриситета e , функции $HV = f_2(d_x)$ становятся асимметричными с некоторым разрывом значений HV в средней части зоны долома, а значения HV_{max} и HV_{min} падают (рис.2). Для унификации расчетов значения HV по диаметральным рядам разделены на две группы – от крайней точки большей зоны вязкого разрушения до середины зоны хрупкого разрушения, и оттуда – до крайней точки меньшей зоны вязкого разрушения (участки A_1, A_2, A_3 и B_1, B_2, B_3 на рис. 2 и табл. 2).

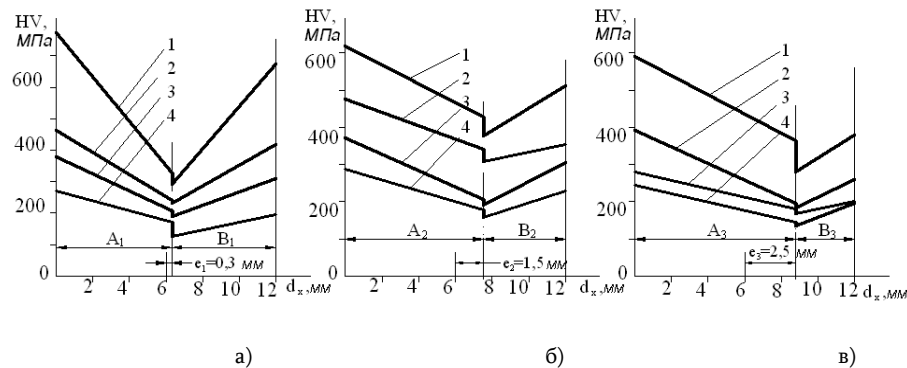


Рис.2. Медианные линии регрессии $HV=f_2(d_x)$ для образцов: а - $\sigma_1=300$ МПа, $N_1=0,53 \cdot 10^5$; б - $\sigma_2=260$ МПа, $N_6=0,55 \cdot 10^6$; в - $\sigma_4=180$ МПа, $N_{10}=0,66 \cdot 10^5$.

Графики 1-4 соответствуют диаметральной линиям на микрошлифе, отстоящим от поверхности излома на: 1 - 0,01 мм, 2 - 0,05 мм, 3 - 0,1 мм и 4 - 0,5 мм

Выяснилось, что наиболее приемлемой формой связи $HV = f_2(d_x)$ является функция $HV = a + b_{HV/dx} d_x$ ($IrI = 0,9455...0,9930$, табл.2).

Общий вид усталостного излома, вариация расположения зон усталостных разрушений и геометрических параметров, а также упрочнение микрообъемов поверхностных слоев излома из-за микропластических деформаций [2, 3], чьи количественные оценки реализованы по результатам массовых измерений HV , свидетельствуют о наличии многопараметрических связей между исследуемыми величинами.

Таблица 2

Линеаризующие преобразования для связи $HV = f_2(d_x)$

№	u=f(v)	Значения $ r_{\max} $ для образцов, испытанных при:					
		$\sigma_1=300 \text{ МПа}$ $N_1=0,53 \cdot 10^5$		$\sigma_2=260 \text{ МПа}$ $N_6=0,55 \cdot 10^5$		$\sigma_4=180 \text{ МПа}$ $N_{10}=0,66 \cdot 10^5$	
		A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	A ₃	B ₃
1	y-x	0,9930	0,9697	0,9939	0,9867	0,9722	0,9455
2	y-1/x	0,9928	0,9640	0,9883	0,9796	0,9583	0,9329
3	lgy-x	0,9923	0,9627	0,9741	0,9454	0,9107	0,9092
4	1/y-1/x	0,9810	0,9613	0,9710	0,9440	0,9055	0,8908
5	1/y-e ^x	0,9865	0,9174	0,9580	0,9235	0,8578	0,8790

Основным фактором, влияющим на вид излома, является уровень циклических перенапряжений σ_i , возникающих в опасном сечении. Таким образом, становится важным комплексное изучение видов изломов, являющихся результатом процессов трещинообразования и развития, что позволит выявить многопараметрические связи между циклическими перенапряжениями и долговечностью, геометрическими параметрами и механическими свойствами валов:

$$F(\sigma_i, v_{\sigma i}, N_i, HV_{\max}, HV'_{\max}, HV_{\min}, HV_o, \sigma_B, \sigma_T, \sigma_R, d, e, \partial_A, b_{y/x}, HB, HRC, z_p, \dots) = 0, \quad (4)$$

где σ_i , N_i , $v_{\sigma i}$ - циклические перенапряжения, долговечности и коэффициент вариации σ_i ; $HV_{\max}$, $HV'_{\max}$, $HV_{\min}$, HV_o , $b_{y/x} = \tan \alpha$ - экстремальные и исходные значения микротвердостей, а также их градиент (рис. 3); σ_B , σ_T , σ_R , HB , HRC - механические свойства материала и поверхностного слоя излома; d , e - диаметр образца и эксцентриситет зон разрушения; $\partial_A = A_\delta / A_o$ - относительный коэффициент площади долома (A_δ , A_o - площади долома и опасного сечения образца).

Подобная комплексная оценка позволяет, кроме традиционно используемого во фрактографии метода визуального исследования излома, который реализует только качественные оценки, перейти на количественную оценку и решить следующую задачу - выявить по внешнему виду усталостного излома путем измерений геометрических параметров зон разрушения и микротвердостей поверхностных слоев предысторию усталостного разрушения и значения действующих перенапряжений, которые и стали причиной этого разрушения. Предлагаемые оценки являются основой для разработки обоснованного метода диагностирования усталостного разрушения, что является важной задачей для экспертной оценки аварий и происшествий в разных сферах производства и транспорте, вышедших из строя инженерных сооружений, технологического оборудования, механизмов и машин, а также дорожно-транспортных средств различного назначения.

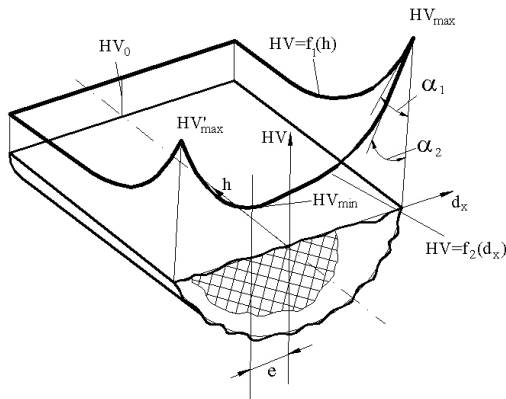


Рис.3. Расчетно-графическая схема

С использованием принципов системного анализа составлена расчетно-графическая схема многопараметрических связей

(рис. 3), что позволяет их представить в виде системы линейных регрессионных уравнений, аргументом которых является σ , а параметром - квантиль z_p :

$$\begin{cases} HV_{\max} = f_1(\sigma), & HV'_{\max} = f_2(\sigma), & HV_{\min} = f_3(\sigma), \\ b_{y/x_1} = f_4(\sigma), & b_{y/x_2} = f_5(\sigma), \\ e = f_6(\sigma), & \partial_A = f_7(\sigma), \\ \sigma = \varphi_1(N_i), & \sigma = \varphi_2(v_{\sigma_i}). \end{cases}$$

(5)

Каждое уравнение системы (5) фактически является математической моделью, характеризующей отдельное явление процесса усталостного разрушения, а сама система в целом позволяет путем различных процедур (визуальной, метрологической, металлографической, расчетной) реализовать обоснованное и комплексное диагностирование усталостного разрушения [3].

Статистические расчеты согласно [4] свидетельствуют (табл. 3), что в координатной системе (y,x) (кроме связи $\sigma_i - N$, которая представлена в системе $\sigma_i - \lg N$) значения выборочного коэффициента корреляции достаточно высокие: $|r| = 0,8124 \dots 0,9780$ при минимальных значениях меры индивидуального рассеяния $s_{y/x}$ ($s_{x/y}$), что значительно повышает достоверность расчетов.

Для проверки достоверности полученных результатов и соответствия действительных и расчетных значений σ_i , полученных с помощью медианных линий регрессии системы (5), для каждого испытанного образца рассчитано по 7 значений, а для каждого уровня перенапряжений - 21 значение σ_i . Предварительная статистическая обработка данных свидетельствует о минимальном расхождении действительных и медианных расчетных значений σ_i (до 4,6%), а величины коэффициентов вариации v_{σ_i} позволяют судить о нормальности распределения расчетных значений σ_i (табл.4).

Таблица 3

Регрессионные связи	r	$S_{y/x}, S_{x/y}$	$B_{y/x}, B_{x/y}$	Значения $A_y, A_x^{(*)}$ при P =				
				0,5	0,9	0,95	0,99	0,999
$HV_{\max} - \sigma$	0,9112	0,2100	0,9400	432,00	430,63	430,55	430,42	430,25
$HV'_{\max} - \sigma$	0,8260	0,5800	1,7480	65,35	64,02	63,77	63,41	62,96
$HV_{\min} - \sigma$	0,9450	0,1200	0,7280	88,82	88,06	88,02	87,95	87,57
$b_{y/x1} - \sigma$	-0,8270	0,2711	-0,5216	16,84	8,86	7,847	6,03	3,96
$b_{y/x2} - \sigma$	0,8124	0,1690	0,0030	-0,23	-0,55	-0,61	-0,72	-0,85
$e - \sigma$	-0,8850	0,0500	-0,1800	56,50	57,05	56,87	56,52	56,16
$\sigma_A - \sigma$	0,9780	0,0130	0,0010	-0,16	-0,11	-0,11	-0,11	-0,12
$\sigma - \lg N^{(*)}$	-0,9260	18,5004	-109,3587	869,3554	869,1281	869,0765	868,9912	869,9213

Примечание: $^{(*)}$ величины относятся к связи $\sigma - \lg N$

Действительные значения σ_i , МПа	Расчетные значения σ_i согласно (5)			Проверка «нулевой» гипотезы по критериям согласия		
	$\bar{\sigma}_i$, МПа	s_{σ} , МПа	v_{σ_i}	λ	w	χ^2
180	181,28	31,76	0,175	0,625	0,950	2,051
220	230,06	28,75	0,125	0,420	0,984	1,439
260	263,79	26,21	0,100	0,625	0,972	1,149
300	308,26	18,39	0,060	0,326	0,993	0,367

Примечание: при $n=21$, $\alpha=0,05$ и $k=2$: $\lambda_{\alpha}=1,04$, $w_{\alpha}=0,908$, $\chi_{\alpha}^2=5,99$

Таблица 4

Комплексная проверка «нулевой» гипотезы нормальности распределения расчетных выборок σ_i проведена согласно критериям Колмогорова-Смирнова - λ , Шапиро-Уилка - w и приближенному критерию Пирсона - χ^2 [5]:

$$\lambda = \max[D_n^+, D_n^-] [\sqrt{n} - 0,01 + 0,85/\sqrt{n}] \leq \lambda_{\alpha} \quad (6)$$

$$w = b^2 / s^2 \geq w_{\alpha}, \chi^2 = (s_k / s_{sk})^2 + (E_k / s_{ek})^2 \leq \chi_{\alpha}^2.$$

Расчетные проверки по критериям согласия (6) свидетельствуют, что выборки σ_i на уровне значимости ($=0,05$ не противоречат нормальному закону распределения (табл.4). Это подтверждается также графической проверкой, построением медианной эмпирической линии распределения σ_i :

$$\hat{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i + z_p s_{\sigma_i} = \bar{\sigma}_i (1 + z_p v_{\sigma_i}) \quad (7)$$

и ее доверительных границ в вероятностных координатах (рис.4), что позволяет в уточненных расчетах использовать значения σ_i с доверительной вероятностью:

$$\bar{\sigma}_i - s_{\sigma_i} \cdot t_{\alpha,k} / \sqrt{n} < \sigma_i < \bar{\sigma}_i + s_{\sigma_i} \cdot t_{\alpha,k} / \sqrt{n}, \quad (8)$$

где $t_{\alpha,k}$ – квантиль распределения Стьюдента при заданном уровне α и $k=n-1$.

Анализ данных табл.4 указывает на наличие еще одной связи между σ_i и коэффициентом вариации v_{σ_i} . Статистическая обработка свидетельствует о наличии тесной линейной корреляционной связи между рассмотренными величинами ($|r|=0,9924$), которая выражается через

$$\bar{\sigma}_{i_v} = A_v + B_{\sigma/v} v_{\sigma_i} = 362,45 - 1064,75 v_{\sigma_i} \quad (9)$$

и может быть введена в систему (5).

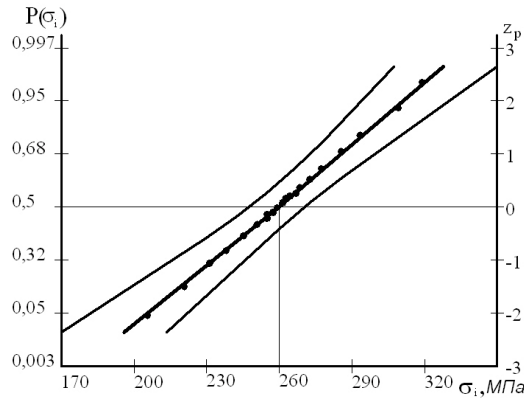


Рис. 4. Медианная линия эмпирической функции (7) и ее 90%-ые доверительные границы при $\sigma_i = 260$ МПа

В производственных условиях при ускоренном анализе и экспертной оценке разрушений техногенного характера и дорожно-транспортных происшествий, а также на начальном этапе исследований наиболее простым и доступным является графический метод решения системы (5) путем построения номограмм, который может быть реализован непосредственными измерениями на месте происшествий, не требует наличия необходимого программного обеспечения и выполнения сложных статистических расчетов.

Анализ и учет требований номографии [6] позволили сгруппировать и представить систему линейных уравнений (5) в виде

$$\begin{cases} HV_{\max} = A_{y1} + B_{y/x1} \sigma, & HV'_{\max} = A_{y2} + B_{y/x2} \sigma, & HV_{\min} = A_3 + B_3 HV_{\max}, \\ b_{y/x1} = A_{y4} + B_{y/x4} \sigma, & b_{y/x2} = A_{y5} + B_{y/x5} \sigma, \\ e = A_{y6} + B_{y/x6} \sigma, & \partial_{\Lambda} = A_{y7} + B_{y/x7} \sigma, \\ \sigma = A_{x1} + B_{x/y1} \lg N, & \sigma = A_v + B_{\sigma/v} v_{\sigma_i}, \end{cases} \quad (10)$$

где $A_3 = (A_{y1} - A_{y3} / B_{y/x3})$, $B_3 = B_{y/x1} / B_{y/x3}$,

и построить номограмму (рис.5) для определения вероятных значений циклических перенапряжений σ_i , ставших причиной усталостного разрушения, а также долговечностей N_i . Сравнительно низкие значения дисперсий расчетных величин предопределили узкие интервалы расположения квантильных линий уравнений (10), что также повышает точность расчетов по номограмме.

Используя результаты фрактографического анализа, метрологические и металлографические измерения поверхности излома и подповерхностных слоев, путем построений на номограмме определяют значения σ_i , рассчитывают среднее значение $\bar{\sigma}_i$, по нему - $\bar{N}_i$ и v_{σ_i} , а затем с помощью v_{σ_i} и (7) – значения $\hat{\sigma}_i$, соответствующие заданной вероятности неразрушения. На рис. 5 представлены графические процедуры и построение эмпирической дифференциальной функции нормального распределения σ_i для уровня перенапряжений $\sigma_i = 260 \text{ МПа}$.

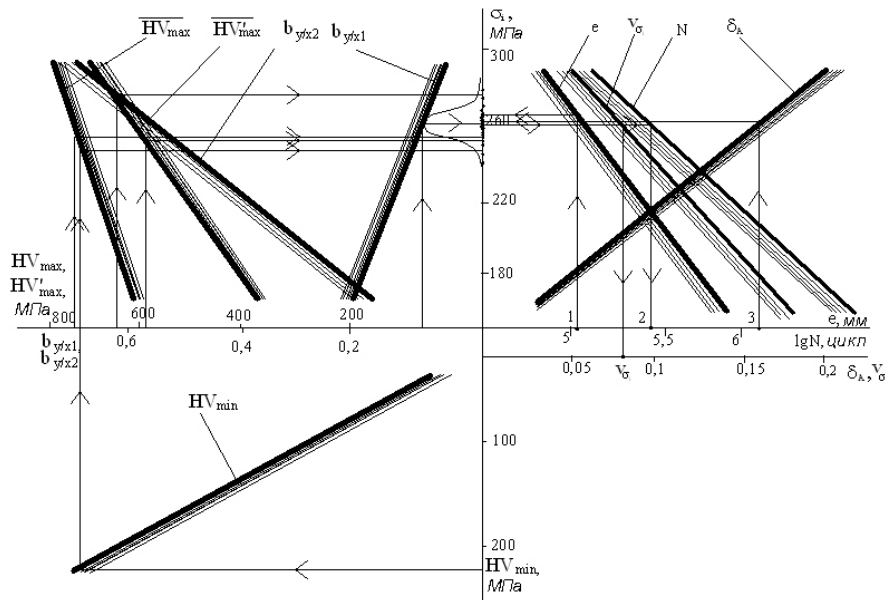


Рис.5. Номограмма $\sigma_i - HV_{\max} - HV'_{\max} - HV_{\min} - b_{y/x1} - b_{y/x2} - e - \delta_A - \lg N - v_{\sigma_i} - z_p$

Применение номограммы позволяет решить следующие задачи:

- а) по экспертной оценке значений σ_i не только выявить недопустимый уровень перенапряжений, но и рассчитать вероятность неразрушения и действительный срок службы машины (механизма);
- б) выявить истинные причины усталостного разрушения (конструкторские недоработки, нарушения технологических процессов, недопустимые режимы и условия эксплуатации, степень воздействия каждого из повреждающих факторов) и выдвинуть предложения по их устранению;
- в) дать обоснованное заключение и выявить степень ответственности обслуживающего персонала в причинах аварии или происшествия;
- г) решить обратную задачу – для обеспечения гарантированного срока службы определить безопасный уровень действующих перенапряжений σ_i с учетом заданной вероятности неразрушения.

Предложенная номограмма обладает определенной универсальностью, т.к. в ней использованы результаты испытаний на усталость и измерений микротвердостей образцов из стали 45, являющейся

основным материалом из класса среднеуглеродистых конструкционных сталей, который широко применяется при изготовлении валов и тяжелонагруженных деталей передаточных механизмов различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Галечян Н.А.** Использование метода микротвердости для оценки режимов современных упрочняющих технологий деталей машин и процессов трещинообразования // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 1996.- Т. 49, № 3.-С. 3-8.
2. **Галечян Н.А.** Оценка процесса усталостного разрушения валов методом измерения микротвердости // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.-2000.-Т.53, № 1. - С. 281-286.
3. **Стакян М.Г., Галечян Н.А.** Метод диагностики усталостных разрушений валов // Сб. мат. год. науч. конф. ГИУА. – Ереван, 2000. – Т.1. – С. 212-213 (на арм. яз.).
4. **Стакян М.Г., Оганесян Л.Г.** Комплексная программа для корреляционного и регрессионного анализа результатов механических испытаний // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - № 11. - С. 47 - 53.
5. **Стакян М.Г., Демирханян А.Р.** Модифицированный метод проверки нормальности распределения результатов механических испытаний // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.-2000.-Т.53, № 3. – С. 271-280.
6. **Хованский Г.С.** Основы номографии. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02. 03. 2001.

Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ , Ն. Ա. ԴԱԼԵՉՅԱՆ ԼԻՄԵՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾՈՅԻՆ ԿՈՏՐՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ԵՎ ԱՐՄՏԱՈՐՈՇՈՒՄԸ

Հոգնածային քայքայման պատճառների արատաորոշման նպատակով գերլարումների տարբեր մակարդակներով փուլային բեռնվածության ենթարկված լարումների կուտակիչով պողպատ 45 մակնիշի փորձանմուշների կոտրվածքների տրամագծային հատույթների վրա իրականացվել են միկրոկարծրության համալիր չափումներ: Փորձի արդյունքները մշակված են հարաբերակցային և հետընթացային վերլուծության մեթոդներով, բացահայտված են միկրոկարծրության ֆունկցիաները հոգնածային դիմադրության բնութագրերից՝ կոտրվածքի խորությամբ և տրամագծային հատույթով, ինչը հնարավորություն է ընձեռել կառուցել նոմոգրամներ, դրանց միջոցով կատարել վնասվածքային գործոնների ազդեցության քանակական գնահատականը և վերականգնել հոգնածային քայքայման նախապատմությունը:

M. G. STAKYAN, N. A. GHALECHYAN COMPLEX RESEARCH AND DIAGNOSING OF THE FATIGUE FRACTURED SHAFTS

To diagnose the reasons of fatigue failure, the complex microhardness measurements were performed on diametrical specimen fracture section of steel 45 with concentrators, priory tested at high, medium and low cyclic superstresses subjected to fatigue failure. The experimental results are processed by the method of correlation and regression analysis. Microhardness distribution functions of depth and diametrical fracture section are revealed. This allows to design the nomogram and give the quantitative evaluation of the failure factor influence, thereby recreating the prehistory of fatigue failure process.