

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 539.4 (075):620.178.3

Д. С. Добровольский, магистрант  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

### ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ВАЛА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ПЕРЕГРУЗОК

*Развит предложенный автором для однократного нагружения метод для определения местных упругопластических напряжений при циклическом нагружении вала в условиях изгиба с вращением. При использовании метода получены экспериментальные значения повреждаемости по результатам проведенных усталостных испытаний модельных элементов вала. Определены расчетные повреждаемости в условиях интенсивных перегрузок вала при использовании известного упругого и предлагаемого упругопластического решений задачи о концентрации напряжений. Показано, что использование упругого решения приводит к очень большим погрешностям расчетной оценки повреждаемости. При использовании предлагаемой методики отличия расчетной повреждаемости от экспериментальной не превышает 10 %.*

**Ключевые слова:** решение пластической задачи о концентрации циклических напряжений; повреждаемость вала при эксперименте, упругом и пластическом решениях.

Изгиб с вращением испытывают участки валов, содержащие кольцевые выточки, переходы диаметров, резьбы и другие концентраторы напряжений. Такого рода нерегулярности формы являются причиной усталостного разрушения валов при долговечностях, превышающих базовое число ( $10^7$  циклов), соответствующее пределу усталости. При частотах вращения  $(3 \div 5) \cdot 10^3$  об./мин базовому числу циклов соответствуют 110 ÷ 55 часов работы вала, а на практике разрушения наблюдаются при на порядки больших наработках. Это обусловлено тем, что наряду с допускаемыми режимами работы валы испытывают кратковременные интенсивные перегрузки, которые вызывают необратимые структурные повреждения, способные развиваться далее при допускаемых режимах работы.

В условиях умеренных перегрузок оценку повреждаемости проводят с привлечением упругих решений для определения местных напряжений. В случае интенсивных перегрузок местное напряженно-деформированное состояние (НДС) является упругопластическим, что не учитывается и вносит погрешности при оценке повреждаемости и прогнозировании долговечности валов. В данной работе предлагается и экспериментально обосновывается методика оценки повреждаемости вала при интенсивных перегрузках на основе развития ранее разработанного для однократного нагружения энергетического метода [1] расчета местного НДС в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании в условиях изгиба с вращением. Для реализации метода в указанных условиях из стали 45 ( $\sigma_T = 480$  МПа;  $\sigma_B = 675$  МПа;  $\delta = 6,7$  %;  $\psi = 46,2$  %;  $E = 2,04 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ) изготавливали и испытывали на циклический упругопластический изгиб по разработанной методике [2] плоские образцы с целью изучения закономерностей циклического упругопластического деформирования. Полученные экспериментальные кривые деформирования в амплитудах циклических напряжений и деформаций при исходном нагружении, в первом полуцикле и на продолжительной ста-

дии их стабилизации аппроксимировали линейно-степенными функциями

$$\sigma = \sigma_{TC} e/e_{TC} \text{ при } \sigma \leq \sigma_{TC}, \quad \sigma = \sigma_{TC} (e/e_{TC})^m \text{ при } \sigma \geq \sigma_{TC}. \quad (1)$$

Параметры аппроксимации  $\sigma_{TC}$ ,  $e_{TC}$ ,  $m$  функций (1) находили обработкой экспериментальных данных: при исходном нагружении  $\sigma_{TC}^{(0)} = 480$  МПа,  $e_{TC}^{(0)} = 0,235$  %,  $m_0 = 0,147$ ; в первом полуцикле нагружения  $\sigma_{TC}^{(1)} = 362$  МПа,  $e_{TC}^{(1)} = 0,177$  %,  $m_1 = 0,181$ ; на стадии стабилизации диаграмм  $\sigma_{TC} = 342$  МПа,  $e_{TC} = 0,168$  %,  $m = 0,164$ . Результаты испытаний показали, что разупрочнение стали 45 привело к снижению пределов текучести в первом цикле и на стадии стабилизации диаграмм циклического деформирования по сравнению с пределом текучести в исходном состоянии материала на 24,6 и 28,7 % соответственно.

Экспериментальную и расчетные оценки повреждаемости при перегрузках проводили на модельных элементах круглого сечения с  $V$ -образным кольцевым надрезом радиусом в вершине 1 мм ( $L = 200$  мм;  $D = 40$  мм;  $d = 20$  мм) и коэффициентом концентрации напряжений при изгибе  $\alpha_\sigma = 2,63$  [3]. Для вычисления местных напряжений в вершине надреза при изгибе с вращением модельных элементов формулы энергетического метода развиты таким образом: при номинально упругом деформировании ( $\sigma_n \leq \sigma_{TC}$ )

$$\sigma_m = \sigma_n (\alpha_\sigma^2 F)^{\frac{m}{1+m}} (\sigma_n / \sigma_{TC})^{\frac{m-1}{m+1}}; \quad (2)$$

$$F = 0,5(1+m) + 0,5(1-m) / (\alpha_\sigma \sigma_n / \sigma_{TC})^2; \quad (3)$$

при номинально упругопластическом деформировании ( $\sigma_n \geq \sigma_{TC}$ )

$$\sigma_m = \sigma_n (\alpha_\sigma^2 F_1)^{\frac{m}{1+m}}, \quad F_1 = 1 - 0,5(1-m)(1 - 1/\alpha_\sigma^2) / \bar{u}_n; \quad (4)$$

$$\bar{u}_n = 0,5 \frac{\sigma_n e_n}{\sigma_{TC} e_{TC}} \left[ 1 + \frac{2}{(1+m)} \left( \frac{\sigma_n e_n}{\sigma_{TC} e_{TC}} - 1 \right) \right], \quad (5)$$

где  $e_n = e_{tc} (\sigma_n / \sigma_{tc})^{1/m}$  – номинальная упругопластическая деформация в вершине надреза.

Усталостные испытания материалов и элементов конструкций, необходимые для оценки повреждаемости, являются длительными и трудоемкими. В связи с этим при первоначальной оценке повреждаемости используются расчетные кривые усталости. Обобщение систематических экспериментальных данных показало [4, 5], что для многих сталей кривую усталости при изгибе с вращением гладкого образца в диапазоне  $N = 10^2 \div 10^5$  циклов до разрушения можно представить таким образом:

$$\sigma_a = (1,75 - 0,224 \lg N) \sigma_b, \quad (6)$$

где  $\sigma_a$  – амплитуда номинально упругих напряжений;  $\sigma_b$  – предел прочности материала. Аналогичную расчетную кривую усталости для вала с кольцевым надрезом можно получить, используя рекомендации Р. Б. Хейвуда

$$\sigma_{n,y} = (1,75 - 0,224 \lg N) \sigma_b / \kappa_{\sigma N}, \quad (7)$$

$$\kappa_{\sigma N} = 1 + q_{\sigma N} (\alpha_{\sigma} - 1), q_{\sigma N} = (\lg N)^4 / [760 + (\lg N)^4], \quad (8)$$

где  $\sigma_{n,y}$  – амплитуда номинально упругих напряжений в вершине надреза;  $\kappa_{\sigma N}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений;  $q_{\sigma N}$  – чувствительность стали к концентрации напряжений.

Оценка повреждаемости элементов конструкций проводится по кривым усталости в местных напряжениях [6]. При изгибе номинальные упругие напряжения в вершине кольцевого надреза вала равны

$$\sigma_{n,y} = M_n / W_n, \quad (9)$$

где  $M_n$  – изгибающий момент;  $W_n$  – момент сопротивления изгибу опасного сечения вала. Для вычисления номинальных упругопластических напряжений используется обобщенное решение задачи изгиба балки круглого сечения [7, с. 114] в безразмерных осях:  $\bar{\sigma}_n = \sigma_n / \sigma_{tc}$ ;  $\bar{e}_n = e_n / e_{tc}$ ;  $\sigma_{n,y} = M_n / W_n$ ;  $\bar{\sigma}_{n,y} = \sigma_{n,y} / \sigma_{tc}$ . При показателе упрочнения аппрок-

симации (1)  $m = 0,164$  обобщенное решение преобразуется к виду

$$\bar{\sigma}_{n,y} = 1,531 \bar{e}_n^{0,164} - \frac{0,845}{\bar{e}_n^2} + \frac{0,314}{\bar{e}_n^3}. \quad (10)$$

По выражению (10) с учетом (7), (8) следует вычислить номинальную упругопластическую деформацию  $\bar{e}_n$ , а затем определить номинальные упругопластические и местные упругие напряжения

$$\sigma_n = \sigma_{tc} \bar{e}_n^m, \quad \sigma_{m,y} = \sigma_n \alpha_{\sigma}. \quad (11)$$

Задаваясь долговечностью  $N$  в диапазоне  $10^2 \div 10^5$  циклов, по соотношениям (6)–(11) можно получить расчетную кривую усталости  $\sigma_{m,y} - N$  модельных элементов при использовании известного упругого решения задачи о концентрации напряжений  $\alpha_{\sigma} = 2,63$ .

Аналогичным образом, применяя выражения (2)–(8), (10) и (11), можно определить расчетную кривую усталости в местных упругопластических напряжениях  $\sigma_m - N$  в диапазоне долговечности  $N = 10^2 \div 10^5$  циклов при использовании предлагаемого упругопластического решения задачи о концентрации напряжений.

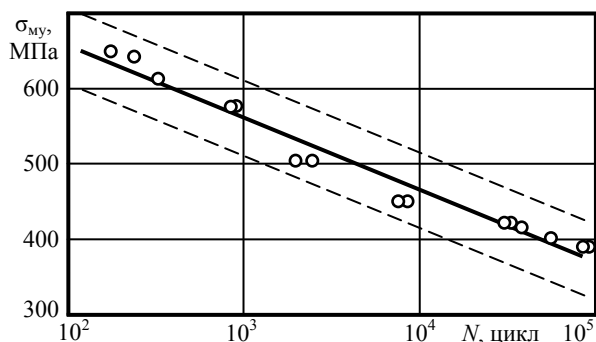
Для экспериментального обоснования предлагаемой методики оценки повреждаемости проводили усталостные испытания при изгибе с вращением 15 указанных выше модельных элементов (МЭ) на модернизированной установке [8]. Результаты испытаний и расчетов местных напряжений приведены в таблице и показаны на рисунке. На основе статобработки экспериментальных данных по рекомендуемой методике [9] получено уравнение кривой усталости

$$\sigma_{MЭ} N^{-0,096849} = 1130 \text{ (МПа)}, \quad (12)$$

необходимое для экспериментальной оценки повреждаемости, и определена тройная мера средней квадратической погрешности  $3\bar{\sigma}_x = 0,519$ , характеризующая поле рассеивания эксперимента с вероятностью 99,7 %.

**Результаты усталостных испытаний МЭ и расчетов напряжений**

№ МЭ	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{n,y}$ , МПа	821	811	755	689	689	544	542	424
$N$ , цикл.	178	244	330	870	903	2036	2563	7761
$\sigma_n$ , МПа	538	532	495	454	454	389	387	358
$\sigma_{MЭ}$ , МПа	707	699	650	596	596	505	502	445
$\sigma_{m,y}$ , МПа	1374	1325	1277	1131	1126	1033	1013	942
$\sigma_m$ , МПа	686	661	638	564	561	511	499	447
№ МЭ	9	10	11	12	13	14	15	
$\sigma_{n,y}$ , МПа	424	325	325	309	275	243	243	
$N$ , цикл.	8520	30573	31720	37374	57215	89779	95310	
$\sigma_n$ , МПа	358	325	325	309	275	243	243	
$\sigma_{MЭ}$ , МПа	445	417	417	412	400	388	388	
$\sigma_{m,y}$ , МПа	938	838	845	808	733	661	652	
$\sigma_m$ , МПа	442	414	415	411	401	391	390	



Экспериментальная кривая усталости МЭ в местных упруго-пластических напряжениях (о – эксперимент; — – вероятность 50 %; --- поле рассеивания эксперимента)

Расчетные кривые усталости  $\sigma_{м.у.} - N$ ,  $\sigma_{м.} - N$ , полученные по соотношениям (2)–(11), неудобны по аналитической форме для оценки повреждаемости. В связи с этим по соотношениям (2)–(11) определяли значения местных упругих  $\sigma_{м.у.}$  и упруго-пластических  $\sigma_{м.}$  напряжений (таблица) для экспериментальных долговечностей. Полученные данные статистически обрабатывали и находили уравнения и тройные меры средних квадратических погрешностей расчетных кривых усталости в местных упругих

$$\sigma_{м.у.} N^{-0,106275} = 2373 \text{ (МПа)}, 3\bar{\sigma}_x = 0,473, \quad (13)$$

и упруго-пластических напряжениях

$$\sigma_{м.} N^{-0,088955} = 1042 \text{ (МПа)}, 3\bar{\sigma}_x = 0,454. \quad (14)$$

При долговечностях модельных элементов  $10^4$  и  $10^5$  циклов экспериментальные повреждаемости за цикл  $d = 1/N$  равны  $10^{-4}$  и  $10^{-5}$ . По уравнению экспериментальной кривой усталости (12) указанным долговечностям соответствуют напряжения 463 и 371 МПа. Расчетные повреждаемости, полученные с использованием уравнения (13) при указанных значениях напряжений, составляют:  $0,0021 \cdot 10^{-4}$  и

$0,0026 \cdot 10^{-5}$ . Аналогичные повреждаемости, определенные по предлагаемой методике с привлечением уравнения (14), равны  $1,10 \cdot 10^{-4}$  и  $0,910 \cdot 10^{-5}$ . Видно, что использование упругого решения приводит к очень большим погрешностям расчетной оценки повреждаемости при интенсивных перегрузках вала, а по предлагаемой методике погрешности расчетов повреждаемости с привлечением упруго-пластического решения не превышают 10 %.

#### Библиографические ссылки

1. Добровольский Д. С. Напряжения и упруго-пластические деформации стержней с кольцевыми трещинами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – № 9. – С. 47–49.
2. Добровольский С. В., Добровольский В. И. Закономерности подобия малоциклового разрушения модели и детали. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 243 с.
3. Добровольский В. И., Кучерявый Б. П., Пряхин В. В. Руководящий технический материал РТМЗ-1637-84. Материалы для штампов. Методы определения прочности при механической малоцикловой усталости. – Введ. впервые 01.01.85. – М. : Стандарты, 1984. – 60 с.
4. Мэнсон С. С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1974. – 344 с.
5. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости : пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
6. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
7. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Деформационные методы оценки малоцикловой прочности. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 402 с.
8. Добровольский Д. С. Методика определения трещиностойкости элементов конструкций с кольцевыми трещинами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2. – С. 64–66.
9. Митропольский К. А. Техника статистических вычислений. – М. : Физматгиз, 1981. – 356 с.

\*\*\*

D. S. Dobrovolsky, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

#### Evaluation of Damage of the Shaft under Intense Overloads

The paper describes the progress in the proposed by the author method for single loading for determining the local elastic-plastic stresses under cyclic loading of the shaft in the condition of bending with rotation. Using this method, the experimental values of the damage are obtained on the results of the fatigue tests of the model elements of the shaft. The estimated damages in conditions of intense overloads of the shaft are determined by using the known elastic and the proposed elastic-plastic solutions of stress concentration. It is shown that the use of elastic solution leads to very large errors of the estimated damage. When using the proposed method the difference of the estimated and experimental damages does not exceed 10 %.

**Keywords:** solution of the plastic problem of cyclic stress concentration; damage of the shaft under experiment, elastic and plastic solutions.

Получено: 06.09.16