

УДК 539.431  
DOI 10.22213/2413-1172-2018-3-20-24

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Д. С. Добровольский, ООО «Научно-производственная фирма «Трест Геопроектстрой», Ижевск, Россия

*Многие элементы конструкций подвергаются при эксплуатации воздействию переменных случайных нагрузок и разрушаются, как правило, в зонах концентрации местных напряжений, упругоэластических деформаций и энергий. Накопление усталостных повреждений в зонах концентрации элементов конструкций принято оценивать по экспериментальным кривым усталости модельных элементов, представленным в номинальных напряжениях, определяемых без учета влияния концентрации, или местных условных напряжениях, вычисляемых как произведение номинальных напряжений и теоретического коэффициента концентрации напряжений в предположении местного упругого деформирования. Использование указанных критериев для получения кривых усталости вносит дополнительные погрешности при оценке повреждаемости и прогнозировании долговечности в условиях случайного нагружения конструкций. В этой связи более совершенной представляется методика оценки повреждаемости в зонах концентрации при прогнозировании долговечности в условиях случайного нагружения конструкций, если использовать экспериментальные кривые усталости моделей, представленные в интенсивностях местных напряжений (силовой подход), упругоэластических деформаций (деформационная трактовка) или удельных энергиях изменения формы (энергетическая концепция), которые учитывают объемность напряженно-деформированного состояния и его кинетику по числу нагружений. Для получения указанных кривых усталости в работе предлагается решение циклической упругоэластической задачи для определения указанных выше силового, деформационного и энергетического локальных критериев прочности. Приводятся результаты применения локальных критериев для экспериментального и аналитического моделирования циклической прочности при изгибе с вращением валов с кольцевым надрезом. Использование локальных критериев прочности позволило более достоверно оценить повреждаемость валов при характерных в условиях эксплуатации перегрузках.*

**Ключевые слова:** силовой, деформационный и энергетический локальные критерии циклической прочности, экспериментальное и аналитическое моделирование циклической прочности валов.

### Введение

**П**ри оценке усталостной прочности элементов конструкций в качестве силовых критериев разрушения в опасных зонах концентрации (отверстия, выточки, резьбы, шпоночные пазы, шлицевые участки, резкие изменения поперечных размеров деталей) используются номинальные напряжения, определяемые без учета влияния надрезов, или местные условные напряжения, вычисляемые в предположении упругого деформирования как произведение номинальных напряжений и теоретических коэффициентов концентрации [1]. В действительности при перегрузках несущих элементов конструкций, а нередко и штатных режимах переменного нагружения в зонах концентрации возникают трехмерные поля главных местных переменных напряжений и упругоэластических деформаций, которые при циклической нестабильности материалов изменяются с ростом числа нагружений.

При обосновании усталостной прочности материалов и несущих элементов атомных реакто-

ров, других ответственных конструкций предпочтительным является деформационный подход, когда в качестве критерия циклической прочности используются фиктивные напряжения, равные произведению модуля упругости и местной упругоэластической деформации [2]. В ряде исследований [3] процесс накопления повреждений и разрушение материала рассматривается с энергетических позиций.

### Разработка критериев циклической прочности элементов конструкций

Академик С. В. Серенсен подчеркивал: «Для получения более достоверных результатов за критерий разрушения целесообразнее использовать такой аргумент, изменяемость которого в процессе нагружения меньше, и который лучше описывает образование разрушения». В данной работе в качестве локальных критериев циклической прочности в ответственных за разрушение зонах концентрации элементов конструкций предлагается использовать интенсивности местных циклических напряжений (силовой подход), упругоэластических деформаций (де-

формационная трактовка) и удельную местную энергию изменения формы (энергетическая концепция) с учетом объемности напряженно-деформированного состояния и его кинетики по числу нагружений.

В работе [4] для практического использования в дальнейшем локальных критериев предложена методика, модернизировано оборудование, получены результаты экспериментального и аналитического моделирования кинетики обобщенных диаграмм циклического упруго-пластического деформирования на примере разупрочняющейся стали 45 ( $\sigma_T = 480$  МПа;  $\sigma_B = 675$  МПа;  $\delta = 6,7$  %;  $\psi = 46,2$  %). Определены параметры линейно-степенной аппроксимации обобщенных диаграмм деформирования в широком диапазоне нагружений. В частности, для обобщенных диаграмм в амплитудах первых главных напряжений  $\sigma^{(0)}$ ,  $\sigma^{(k)}$  и упруго-пластических деформаций  $e^{(0)}$ ,  $e^{(k)}$  получено: при исходном нагружении  $\sigma_{TC}^{(0)} = 480$  МПа,  $e_{TC}^{(0)} = 0,235$  %,  $m = 0,145$ ; в первом полупериоде  $\sigma_{TC}^{(1)} = 362$  МПа,  $e_{TC}^{(1)} = 0,177$  %,  $m_1 = 0,184$ ; на стадии, соответствующей половине долговечности образца,  $\sigma_{TC} = 342$  МПа,  $e_{TC} = 0,168$  %,  $m = 0,171$ . Аналогичные параметры обобщенных диаграмм в интенсивностях напряжений  $\sigma_i^{(0)}$ ,  $\sigma_i^{(k)}$  и упруго-пластических деформаций  $e_i^{(0)}$ ,  $e_i^{(k)}$  равны: при исходном нагружении  $\sigma_{TC}^{(0)} = 480$  МПа,  $e_{TC}^{(0)} = 0,204$  %,  $m_i = 0,147$ ; в первом полупериоде  $\sigma_{TC}^{(1)} = 362$  МПа,  $e_{TC}^{(1)} = 0,154$  %,  $m_{i1} = 0,181$ ; на стадии, соответствующей половине долговечности образца,  $\sigma_{TC} = 342$  МПа,  $e_{TC} = 0,154$  %,  $m_i = 0,164$ .

Развивая метод [5] и его реализацию [6], предложенные для однократного нагружения элементов конструкций с трещинами, применительно к циклическому нагружению элементов конструкций с надрезами получены силовой (интенсивность местных напряжений  $\sigma_{iM}$ ) и деформационный (интенсивность местных упруго-пластических деформаций  $e_{iM}$ ) локальные критерии: при номинальном упругом деформировании ( $\sigma_{iH} \leq \sigma_{iT}$ ) зоны надреза

$$\sigma_{iM} = \sigma_{iH} (\alpha_i^2 F)^{\frac{m_i}{1+m_i}} (\sigma_{iH} / \sigma_{iT})^{\frac{m_i-1}{m_i+1}}, \quad (1)$$

$$e_{iM} = e_{iH} (\alpha_i^2 F)^{\frac{1}{1+m_i}} (\sigma_{iH} / \sigma_{iT})^{\frac{1-m_i}{1+m_i}}, \quad (2)$$

$$F = 0,5(1+m_i) + \frac{0,5(1-m_i)}{(\alpha_i \sigma_{iH} / \sigma_{iT})^2}; \quad (3)$$

при номинальном упруго-пластическом деформировании ( $\sigma_{iH} \geq \sigma_{iT}$ )

$$\sigma_{iM} = \sigma_{iH} (\alpha_i^2 F)^{\frac{m_i}{1+m_i}}, \quad e_{iM} = e_{iH} (\alpha_i^2 F)^{\frac{1}{1+m_i}}, \quad (4)$$

$$F = 1 - \frac{0,5(1-m_i)\sigma_{iT}e_{iT}}{u_{HF}} \left(1 - \frac{1}{\alpha_i^2}\right), \quad (5)$$

$$u_{HF} = 0,5\sigma_{iT}e_{iT} \left[1 + \frac{2}{1+m_i} \left(\frac{\sigma_{iM}e_{iM}}{\sigma_{iT}e_{iT}} - 1\right)\right], \quad (6)$$

где  $u_{HF}$  – удельная номинальная энергия изменения формы в вершине надреза;  $\sigma_{iH}$ ,  $e_{iH}$  – интенсивности номинальных напряжений и деформаций;  $\alpha_i$  – коэффициент концентрации интенсивности упругих напряжений. Локальный энергетический критерий прочности (местная удельная энергия изменения формы в вершине надреза  $u_{MF}$ ) равен

$$u_{MF} = 0,5\sigma_{iT}e_{iT} \left[1 + \frac{2}{1+m_i} \left(\frac{\sigma_{iM}e_{iM}}{\sigma_{iT}e_{iT}} - 1\right)\right]. \quad (7)$$

### Моделирование циклической прочности элементов конструкций

Практическое использование локальных критериев рассматривали на примерах экспериментального и аналитического моделирования циклической прочности валов при изгибе с вращением. С этой целью предварительно из разупрочняющейся стали 45 изготавливали 15 моделей вала, содержащих V-образные кольцевые надрезы радиусом в вершине  $\rho = 1$  мм. Диаметр брутто-сечения  $D = 40$  мм, нетто-сечения  $d = 20$  мм, длина 200 мм. При отношении  $d/\rho = 20$  теоретический коэффициент концентрации упругих напряжений при изгибе  $\alpha_\sigma = 2,63$ , а коэффициент концентрации интенсивности упругих напряжений  $\alpha_i = \sigma_{iM} / \sigma_{iH} = 2,34$  [7]. Экспериментальное моделирование циклической прочности при изгибе с вращением с частотой 0,17 Гц моделей вала осуществляли на модернизированной установке [8]. Циклические испытания моделей проводили при задаваемых амплитудах номинальных упругих напряжений  $\sigma_{Hy} = M_n / W_n$ , где  $M_n$  – изгибающий момент в нетто-сечении модели;  $W_n = \pi d^3 / 32$  – момент сопротивления изгибу нетто-сечения. По показаниям счетчика фиксировали числа циклов  $N$  до разрушения. Результаты испытаний 15 моделей приведены в таблице.

**Результаты экспериментального моделирования циклической прочности моделей вала в условиях изгиба с вращением при силовом, деформационном и энергетическом критериях разрушения**

№ мод.	$N$ , цикл	$\sigma_{ny}$ , МПа	$\sigma_{in}$ , МПа	$\sigma_{im}$ , МПа	$e_{in}$ , %	$e_{im}$ , %	$u_{nF}$ , МПа	$u_{mF}$ , МПа
1	178	821	538	682	2,30	9,76	10,4	57,0
2	244	811	532	673	2,14	9,10	9,63	52,4
3	330	755	495	626	1,38	5,80	5,70	25,6
4	870	689	454	572	0,816	3,35	3,00	16,3
5	903	689	454	572	0,816	3,35	3,00	16,3
6	2039	544	389	480	0,318	1,14	0,885	4,54
7	2563	542	388	479	0,313	1,13	0,880	4,50
8	7761	424	355	415	0,182	0,470	0,377	1,50
9	8520	424	355	415	0,182	0,470	0,377	1,50
10	30373	325	325	405	0,138	0,400	0,224	1,23
11	31720	325	325	405	0,138	0,400	0,224	1,23
12	37374	309	309	400	0,131	0,380	0,202	1,12
13	57215	275	275	389	0,117	0,320	0,161	0,880
14	89779	243	243	378	0,103	0,287	0,125	0,786
15	95310	243	243	378	0,103	0,287	0,125	0,786

Анализ результатов экспериментального моделирования циклической прочности моделей вала

Далее выполняли обработку результатов испытаний. При номинальном упругом циклическом деформировании моделей ( $\sigma_{ny} \leq \sigma_{гс}$ ) интенсивности номинальных напряжений и деформаций равны  $\sigma_{in} = \sigma_{ny}$ ,  $e_{in} = e_{гс} \sigma_{in} / \sigma_{гс}$ . Для определения аналогичных величин при номинальном упругопластическом циклическом деформировании ( $\sigma_{ny} > \sigma_{гс}$ ) использовали обобщенное решение задачи упругопластического изгиба [9], которое для балки круглого сечения при показателе степенного упрочнения стали 45  $m = 0,171$  преобразуется к виду

$$\sigma_{ny} = \sigma_{гс} \left[ 1,531(e_n/e_{гс})^{0,171} - \frac{0,845}{(e_n/e_{гс})^2} + \frac{0,314}{(e_n/e_{гс})^3} \right]. \quad (8)$$

По известным экспериментальным значениям  $\sigma_{ny}$  из формулы (8) находили  $e_n$ . Затем определяли интенсивности номинальных напряжений  $\sigma_{in} = \sigma_n = \sigma_{гс} (e_n/e_{гс})^m$  и упругопластических деформаций  $e_{in} = e_{гс} (\sigma_{in}/\sigma_{гс})^{1/m_i}$ . При номинальном упругом циклическом изгибе нетто-сечения вала номинальная удельная энергия формы в вершине надреза равна  $u_{nF} = 0,5\sigma_{in}e_{in}$ , а для номинального упругопластического деформирования использовали формулу (6). Применяя соотношения (1), (2), (4) и (7), определяли экспериментальные значения силового  $\sigma_{im}$ , де-

формационного  $e_{im}$  и энергетического  $u_{mF}$  локальных критериев прочности (табл.). Затем получали экспериментальные кривые циклической прочности (точки)  $\sigma_{im} - N$ ,  $e_{im} - N$ ,  $u_{mF} - N$  моделей вала (рис. 1–3).

В соответствии с работами [10, 11] зависимость  $\sigma_{ny} - N$  при изгибе с вращением стальных валов с кольцевым надрезом имеет вид

$$\sigma_{ny} \approx (1,75 - 0,224 \lg N) \sigma_B / \kappa_{\sigma N}. \quad (9)$$

Для эффективного коэффициента концентрации напряжений  $\kappa_{\sigma N}$  и чувствительности сталей к концентрации напряжений рекомендуются зависимости

$$\kappa_{\sigma N} = 1 + q_{\sigma N} (\alpha_{\sigma} - 1),$$

$$q_{\sigma N} = (\lg N)^4 / [760 + (\lg N)^4]. \quad (10)$$

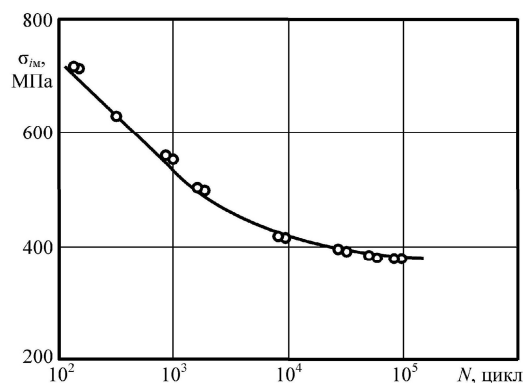


Рис. 1. Зависимость интенсивности местных напряжений  $\sigma_{im}$  от числа циклов  $N$  до разрушения моделей вала с кольцевым надрезом при изгибе с вращением (● – эксперимент, — – прогноз)

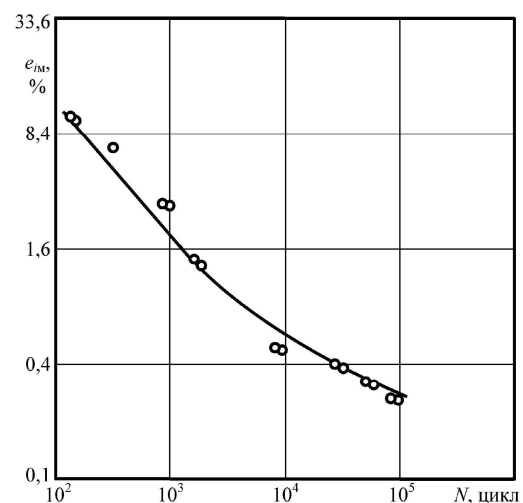


Рис. 2. Зависимость интенсивности местных упругопластических деформаций  $e_{im}$  от числа циклов  $N$  до разрушения моделей вала с кольцевым надрезом при изгибе с вращением (● – эксперимент, — – прогноз)

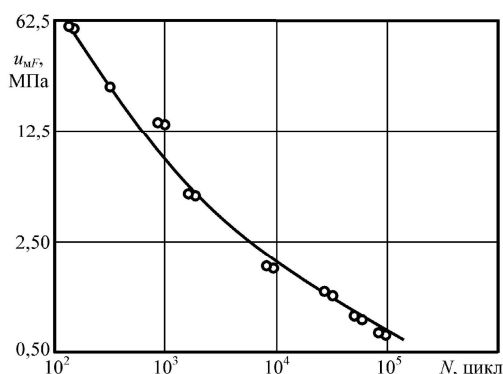


Рис. 3. Зависимость местной энергии изменения формы  $u_{mF}$  от числа циклов  $N$  до разрушения модели вала с кольцевым надрезом при изгибе с вращением (● – эксперимент, — – прогноз)

Используя зависимости (9), (10) и выражения (1)–(8), проводили аналитическое моделирование циклической прочности валов по силовому  $\sigma_{iM}$ , деформационному  $e_{iM}$  и энергетическому  $u_{mF}$  локальным критериям. Последовательность расчетов рассмотрим на примерах.

Пример № 1. Для модели вала № 1 долговечность  $N = 178$  циклов (табл.). Используя зависимости (9), (10) при  $\alpha_\sigma = 2,63$  и  $\sigma_B = 675$  МПа, получаем:  $q_{\sigma N} = 0,031$ ;  $\kappa_{\sigma N} = 1,05$ ;  $\sigma_{Hy} = 801$  МПа. По формуле (8) находим  $e_n = 2,04$  %. Вычисляем интенсивности номинальных напряжений  $\sigma_{iH} = \sigma_n = \sigma_{TC} (e_n / e_{TC})^m = 524$  МПа и упругопластических деформаций  $e_{iH} = e_{TC} (\sigma_{iH} / \sigma_{TC})^{1/m_i} = 2,09$  %. По выражениям (4)–(7) при  $F = 0,984$  вычисляем:  $\sigma_{iM} = 665$  МПа;  $e_{iM} = 8,37$  %;  $u_{mF} = 47,5$  МПа. Соответствующие экспериментальные значения критериев равны:  $\sigma_{iM} = 682$  МПа;  $e_{iM} = 9,76$  %;  $u_{mF} = 57,0$  МПа. В данном примере отклонения аналитических от экспериментальных результатов составили  $-2,5$ ,  $-14,2$  и  $-16,5$  % соответственно.

Пример № 2. Для модели вала № 7 долговечность  $N = 2563$  цикла. Аналогичным образом получаем:  $q_{\sigma N} = 0,144$ ;  $\kappa_{\sigma N} = 1,335$ ;  $\sigma_{Hy} = 539$  МПа;  $e_n = 0,341$  %;  $\sigma_{iH} = 386$  МПа;  $e_{iH} = 0,304$  %;  $\sigma_{iM} = 477$  МПа;  $e_{iM} = 1,095$  %;  $u_{mF} = 4,31$  МПа. Полученные выше экспериментальные значения критериев равны:  $\sigma_{iM} = 479$  МПа;  $e_{iM} = 1,14$  %;  $u_{mF} = 4,50$  МПа. Отклонения результатов прогноза от эксперимента составили  $-0,4$ ,  $-3,9$  и  $-4,2$  % соответственно.

Пример № 3. Для модели вала № 15 при долговечности  $N = 95310$  циклов получено:  $q_{\sigma N} = 0,430$ ;  $\kappa_{\sigma N} = 1,71$ ;  $\sigma_{Hy} = 250$  МПа <  $\sigma_{TC} = 343$  МПа;  $\sigma_{iH} = \sigma_{Hy} = 250$  МПа;  $e_{iH} = 0,106$  %;  $\sigma_{iM} = 388$  МПа;  $e_{iM} = 0,313$  %;  $u_{mF} = 0,866$  МПа. Эксперименталь-

ные значения критериев равны:  $\sigma_{iM} = 378$  МПа;  $e_{iM} = 0,287$  %;  $u_{mF} = 0,786$  МПа. Отклонения данных аналитического моделирования от эксперимента составили  $+2,6$ ,  $+9,1$  и  $+10,2$  % соответственно.

### Заключение

Результаты аналитического моделирования циклической прочности валов по локальным критериям нанесены на рис. 1–3 сплошными линиями. Получено приемлемое соответствие аналитического и экспериментального моделирования циклической прочности валов.

Таким образом, предложены и обоснованы при экспериментальном и аналитическом моделировании более совершенные силовой, деформационный и энергетический локальные критерии циклической прочности элементов конструкций. Показано [12], что использование локальных критериев позволяет более достоверно оценивать повреждаемость и долговечность валов при характерном для эксплуатации нестационарном нагружении.

### Библиографические ссылки

1. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М. : Машиностроение, 1975. 488 с.
2. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М. : Машиностроение, 1981. 272 с.
3. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев : Наукова думка, 1981. 342 с.
4. Добровольский Д. С. Моделирование циклического упругопластического деформирования при испытаниях материала на изгиб // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. № 2. С. 19–23.
5. Добровольский Д. С. Энергетический метод определения напряжений и упругопластических деформаций элементов конструкций с трещинами // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1. С. 4–6.
6. Добровольский Д. С. Напряжения и упругопластические деформации стержней с кольцевыми трещинами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 9. С. 65–69.
7. 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. М. : Стандарты, 1984. 60 с.
8. Авт. св. № 513297. Установка для испытания на усталость образцов при чистом изгибе / В. И. Добровольский. М. : Стандарты, 1976. № 17.
9. Добровольский В. И. Определение напряжений при чистом упругопластическом изгибе или кручении // Проблемы прочности. 1972. № 12. С. 93–94.

10. Мэнсон С. С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. М. : Машиностроение, 1974. 344 с.

11. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. М. : Машиностроение, 1969. 504 с.

12. Добровольский Д. С. Оценка повреждаемости вала в условиях интенсивных перегрузок // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3. С. 30–32.

### References

1. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shnejderovich R. M. *Nesushhaja sposobnost' i raschety detalej mashin na prochnost'* [Carrying capacity and calculation of machine parts for durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 488 p. (in Russ.).

2. Mahutov N. A. *Deformacionnye kriterii razrusheniya i raschet ehlementov konstrukcij na prochnost'* [Deformation criteria for destruction and calculation of structural elements for strength]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 272 p. (in Russ.).

3. Troshchenko V. T. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogociklovom nagruzenii* [Deformation and fracture of metals under multicyclic loading]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, 342 p. (in Russ.).

4. Dobrovolsky D. S. [Modeling of cyclic elastoplastic deformation during material testing for bending]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2018, no. 2, pp. 19-23 (in Russ.).

5. Dobrovolsky D. S. [Energy method for determining stresses and elastoplastic deformations of structural

elements with cracks]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 1, pp. 4-6 (in Russ.).

6. Dobrovolsky D. S. [Stresses and elastoplastic deformations of rods with annular cracks]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, no. 9, pp. 65-69 (in Russ.).

7. Dobrovolsky V. I., Kucherjavij B. P., Prjahn V. V. *Rukovodjashhij tehnikeskij material RTMZ-1637-84. Materialy dlja shtampov. Metody opredelenija prochnosti pri mehanicheskoj malociklovoj ustalosti* [Leading technical material RTMZ-1637-84. Materials for stamps. Methods for determining the strength at mechanical low-cycle fatigue]. Moscow, Standarty Publ., 1984, 60 p. (in Russ.).

8. Dobrovolsky V. I. *Ustanovka dlja ispytaniya na ustalost' obrazcov pri chistom izgibe* [Installation for fatigue testing of samples in pure bending]. Author. St. 513297. Moscow, Standards Publ., 1976, no. 17 (in Russ.).

9. Dobrovolsky V. I. [Determination of stresses in pure elastoplastic bending or torsion]. *Problemy prochnosti*, 1972, no. 12, pp. 93-94 (in Russ.).

10. Manson S. S. *Temperaturnye napryazheniya i malociklovaya ustalost'* [Temperature stresses and low cycle fatigue]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 344 p. (in Russ.).

11. Heywood R. B. *Proektirovanie s uchetom ustalosti* [Designing against fatigue]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 504 p. (in Russ.).

12. Dobrovolsky D. S. [Assessment of shaft damage under conditions of intensive overloads]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 3, pp. 30-32 (in Russ.).

### Development of Criteria and Modeling of Cyclic Strength of Elements of Structures

D. S. Dobrovolsky, Scientific and Production Company "Trest Geoproektstroy", Izhevsk, Russia

*Many structural elements are exposed to variable random loads during operation and are destroyed, as a rule, in zones of concentration of local stresses, elastoplastic deformations and energies. Accumulation of fatigue damages in the zones of concentration of structural elements is usually evaluated by the experimental fatigue curves of model elements, represented in nominal stresses, determined without taking into account the effect of concentration or local conditional stresses, calculated as the product of nominal stresses and the theoretical stress concentration coefficient under the assumption of local elastic deformation. The use of these criteria for the generation of fatigue curves introduces additional errors in the assessment of damage and prediction of durability under conditions of random loading of structures. In this connection, a method for estimating damage in concentration zones when predicting durability under conditions of random loading of structures is presented, if we use the experimental fatigue curves of models presented in local stress intensities (force approach), elastoplastic deformations intensities (deformation treatment) or specific energy of shape change (energy concept), which take into account the bulk of the stress-strain state and its kinetics in terms of the number of loads. To obtain these fatigue curves, we propose a solution of the cyclic elastoplastic problem for determining the strength, deformation, and energy local strength criteria specified above. Results of application of local criteria for experimental and analytical modeling of cyclic strength at bending with rotation of shafts with a ring notch are resulted. The use of local strength criteria has made it possible to more reliably estimate the damage to shafts under conditions of overload characteristic during operation.*

**Keywords:** force, deformation and energy local criteria of cyclic strength; experimental and analytical modeling of cyclic strength of shafts.

Получено 19.06.2018