

УДК 539.374: 620.178.3

В. И. Добровольский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

С. В. Добровольский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Д. С. Добровольский, студент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Проведено обоснование предложенного [1] метода прогнозирования малоцикловой долговечности деталей на основе результатов испытаний гладких образцов и конструктивных элементов с V-образными надрезами, моделирующих работу материала в зонах концентрации напряжений, в частности, гравюр кузнечных штампов, корпусов гидронасосов высокого давления, испытывающих за время эксплуатации малое число нагружений.

Ключевые слова: образец, элемент конструкции, концентрация и градиент энергии, критерий подобия.

В качестве материала для исследования выбрана сталь 5ХНМ ($\sigma_{0,2} = 1240$ МПа; $\sigma_b = 1380$ МПа; $\delta = 13$ %; $\psi = 38$ %), используемая для кузнечных штампов [2, 3] и деталей монтажно-демонтажной гидрооснастки [4, 5]. Для малоцикловых испытаний изготавливали гладкие образцы длиной рабочей части 30 мм, шириной прямоугольного сечения $b_c = 10$ мм и высотой $h_c = 5$ мм. В соответствии с разработанными в ИМИ – ИжГТУ рекомендациями [2] конструктивными элементами служили модели с V-образными односторонними надрезами радиусом 0,25 и 1,5 мм с размерами прямоугольного нетто-сечения шириной $b = 10$ мм и высотой $h = 5$ мм, для которых теоретические коэффициенты концентрации напряжений α_σ составляют 3,58 и 1,90. Закономерности малоциклового деформирования и разрушения образцов и конструктивных элементов изучали на созданном оборудовании [6–8] по разработанной методике [9–11]. Трудоемкие и длительные испытания образцов и конструктивных элементов проводились, в основном, Д. С. Добровольским в условиях чистого изгиба при наиболее опасном симметричном цикле нагружения с частотой 8 цикл/мин. Для этого задавалась амплитуда номинальных упругих напряжений, выборочно по числу нагружений регистрировались диаграммы упругопластического деформирования, затем визуально фиксировалось число циклов N_T до образования трещин размером 0,5...0,8 мм.

Результаты испытаний образцов показали, что после непродолжительной стадии разупрочнения стали наступает стабилизация диаграммы упругопластического деформирования $\sigma - \varepsilon$, описываемой зависимостью (1) [1] со следующими экспериментально полученными параметрами: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $C_\sigma = 1,75$; $\sigma_b = 2415$ МПа; $C_p = 32,9$; $m = 0,1065$. Используемые в этой работе другие формулы также приведены в статье [1].

При испытаниях конструктивных элементов задавали симметричный цикл по упругим напряжениям, а амплитуду номинальных напряжений σ_n определяли

по стабилизированной диаграмме деформирования $\sigma - \varepsilon$ материала с учетом их перераспределения вследствие упругопластического деформирования. Визуально фиксировали также число циклов N_T до образования трещины размером 0,5...0,8 мм в вершине надреза.

Для полученного номинального напряжения σ_n находили опытные значения амплитуды номинальной энергии u_n для конструктивного элемента (на рис. 1 точки). Затем строили экспериментальные кривые малоцикловой усталости конструктивных элементов в амплитудах местных энергий $u_m = u_n \alpha_{u1} = u_n \alpha_\sigma^2$. На рис. 1 для сравнения нанесена также экспериментальная кривая малоцикловой усталости $u - N_T$ для образцов (точки).

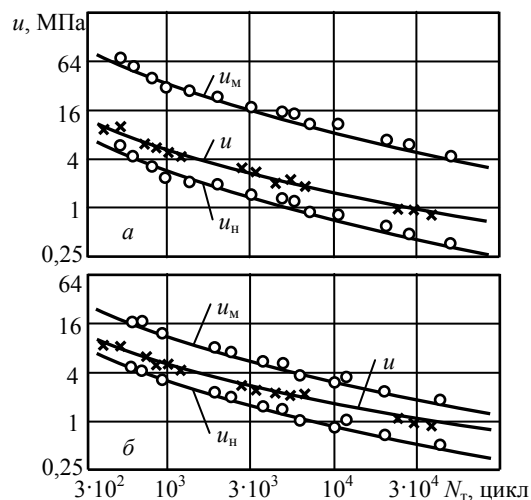


Рис. 1. Кривые малоцикловой усталости в амплитудах номинальных u_n и местных u_m энергий для конструктивных элементов с радиусами надреза 0,25 мм (а) и 1,5 мм (б), а также в амплитудах удельных энергий u для образцов (линии – расчетные данные, точки – эксперимент)

Как видно, при рассматриваемой долговечности N_T с уменьшением радиуса надреза конструктивных

элементов снижаются номинальные энергии и повышаются местные энергии. С физической точки зрения полученные экспериментальные данные находятся в полном соответствии с основными положениями градиентальных теорий прочности [12–15].

Относительный градиент изменения удельной энергии для образца \bar{G}_{uc} зависит от стадии упруго-пластического деформирования, а значит, и его долговечности N_T . Как следует из формулы (16), при упругом деформировании $\bar{G}_{uc} = 2\bar{G}_{\sigma\epsilon}$, а при предельном пластическом $\bar{G}_{uc} = (1+m)\bar{G}_{\sigma\epsilon}$. Для определения численных значений \bar{G}_{uc} задавались долговечностью N_T в диапазоне $3 \cdot 10^2 \dots 10^5$ циклов, по уравнению (21) вычислялись энергии u_e, u_p, u , а затем по формуле (16) – значения относительного градиента изменения удельной энергии \bar{G}_{uc} для образца при изгибе (на рис. 2 кривая 1). Это позволило, используя формулы (15)–(17), получить критерий подобия $K_{ки}$ для конструктивных элементов (кривые 2, 3).

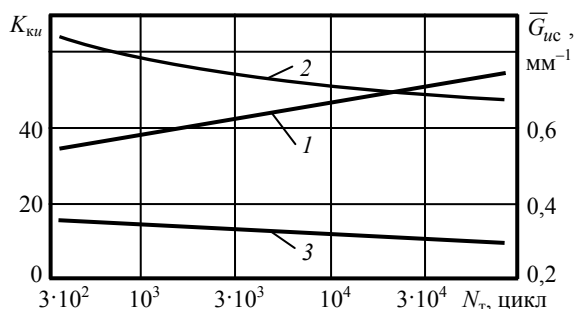


Рис. 2. Зависимость относительного градиента изменения энергии \bar{G}_{uc} для образцов (1), критерия подобия $K_{ки}$ для конструктивных элементов с радиусами надреза 0,25 (2) и 1,5 мм (3) от числа циклов N_T до образования трещины

По данным малоцикловых испытаний образцов и конструктивных элементов (рис. 1) определялись экспериментальные значения эффективных коэффициентов концентрации (ЭКК) энергии $k_{иэ}$ в зависимости от долговечности N_T (на рис. 3 сплошные линии 1, 2). Установлено, что величина ЭКК энергии зависит от радиуса надреза, причем с увеличением долговечности она возрастает. Для дальнейшего анализа результатов малоцикловых испытаний с учетом формул (10), (19) и (20) вычислялись экспериментальные значения параметра чувствительности материала к концентрации энергии $m_{киэ}$ для конструктивных элементов с радиусами надреза 0,25 и 1,5 мм (на рис. 3 штриховые линии 3, 4 соответственно). Видно, что с уменьшением радиуса надреза, а следовательно, увеличением местной энергии u_m параметр $m_{киэ}$ возрастает, что согласуется с результатами численного анализа формулы (22). Теоретические значения параметра чувствительности исследуемой стали к концентрации энергии $m_{ки}$ находились по формуле (22) с учетом (21) для долговечностей $N_T = 1 \dots 10^5$ циклов (рис. 4).

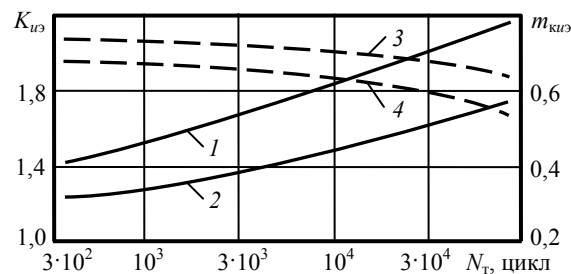


Рис. 3. Изменение экспериментальных значений эффективных коэффициентов концентрации энергии $K_{иэ}$ (1, 2) и параметра чувствительности материала к концентрации энергии $m_{киэ}$ (3, 4) для конструктивных элементов с радиусами надреза, соответственно, 0,25 и 1,5 мм в зависимости от числа циклов N_T до образования трещины

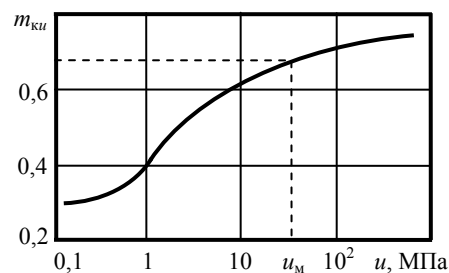


Рис. 4. Прогнозируемые значения параметра чувствительности материала к конструктивной концентрации $m_{ки}$ в зависимости от амплитуды удельной энергии u упруго-пластической деформации

Представляют интерес данные аналитического описания кривых малоциклового усталости конструктивных элементов на основе предложенного [1] метода и с учетом прогнозируемых значений параметра $m_{ки}$ (рис. 4). С этой целью по формуле (20), используя (10) и (19), определялись ЭКК энергии $k_{и}$ для рассматриваемой долговечности N_T . В первом приближении принималась величина $u_m = u\alpha_{и1}$, и по рис. 4 находились теоретические значения $m_{ки}$. Затем по прогнозируемой [11] кривой малоциклового усталости образцов $u - N_T$ устанавливались амплитуды номинальной $u_n = u/k_{и}$ и местной $u_m = u_n\alpha_{и1}$ энергий для конструктивных элементов. В случае необходимости по величине u_m уточнялось значение $m_{ки}$, и расчеты повторялись. Результаты таких расчетов представлены на рис. 1 (линии).

Для прогнозирования малоциклового долговечности конструктивных элементов с помощью формул (4) по расчетной амплитуде номинальной энергии u_n при рассматриваемой долговечности N_T определялись номинальные напряжения σ_n . На рис. 5 представлены прогнозируемые кривые малоциклового усталости $\sigma_n - N_T$, характеризующие долговечность конструктивных элементов. Там же нанесены соответствующие экспериментальные данные (точки).

Анализ результатов экспериментов и прогнозирования малоциклового долговечности конструктивных элементов при энергетической трактовке малоциклового усталости свидетельствует об их удовлетвори-

тельном соответствии. Это подтверждает возможность практического использования предложенного [1] метода.

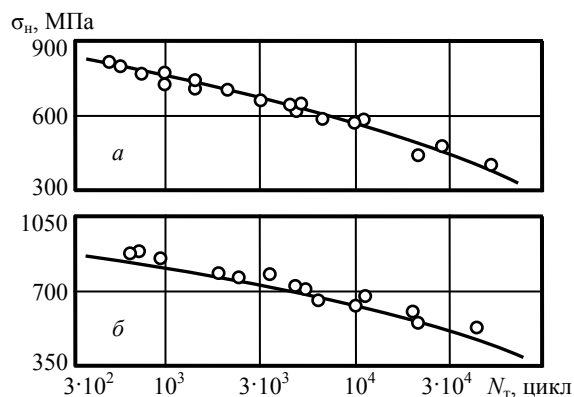


Рис. 5. Кривые малоциклового усталости в номинальных напряжениях для конструктивных элементов с радиусами надреза 0,25 мм (а) и 1,5 мм (б) в зависимости от числа циклов N_T до образования трещины

Библиографические ссылки

1. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Метод прогнозирования малоциклового долговечности элементов конструкций // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 1(61). – С. 32–35.
2. Руководящий технический материал РТМЗ-1637-84. Материалы для штампов. Методы определения прочности при механической малоциклового усталости [введ. 01.01.85].
3. Добровольский В. И., Добровольский С. В. Деформационные методы оценки малоциклового прочности. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 402 с.
4. Абрамов И. В. Эффективность работы бумагоделательных машин. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 120 с.
5. Добровольский С. В., Добровольский В. И. Закономерности подобия малоциклового разрушения модели и детали. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 243 с.
6. А. с. 513297 СССР. Установка для испытаний на усталость образцов при чистом изгибе / В. И. Добровольский (СССР). – Оpubл. в Б. И. – 1976. – № 17.
7. А. с. 697875 СССР. Установка для испытания материалов на малоциклового усталость при чистом изгибе / В. И. Добровольский (СССР). – Оpubл. в Б. И. – 1979. – № 42.
8. А. с. 953514 СССР. Установка для малоциклового испытаний образцов материалов / В. И. Добровольский (СССР). – Оpubл. в Б. И. – 1982. – № 31.
9. А. с. 911129 СССР. Способ измерения деформаций при изгибе / В. И. Добровольский (СССР). – Оpubл. в Б. И. – 1982. – № 9.
10. А. с. 974209 СССР. Способ определения характеристик сопротивления малым пластическим деформациям / В. И. Добровольский (СССР). – Оpubл. в Б. И. – 1982. – № 42.
11. Добровольский С. В. Методика и результаты малоциклового испытаний материалов и конструктивных элементов при энергетическом подходе // Заводская лаборатория. – 1996. – № 12. – С. 39–42.
12. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов : пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1964. – 275 с.
13. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М. : Машиностроение, 1977. – 232 с.
14. Добровольский В. И. Теория подобия малоциклового усталостного разрушения // Проблемы прочности. – 1981. – № 6. – С. 12–17.
15. Добровольский С. В. Энергетическая модель подобия малоциклового разрушения образца и элемента конструкции // Проблемы прочности. – 1999. – № 6. – С. 23–34.

V. I. Dobrovolsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 S. V. Dobrovolsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
 D. S. Dobrovolsky, Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Experimental Substantiation of the Method of Predicting the Low-Cyclic Durability of Elements of Constructions

The paper substantiates the proposed [1] method for estimating the low-cyclic durability of parts on the basis of results of testing the smooth specimens and structural elements with V-shaped notches, modeling the operation of the material in the stress concentration zones, in particular, forge stamp engravings, hulls of high pressure pumps, experiencing a small number of loading during the operation.

Key words: specimen, element of construction, concentration and gradient of energy, similarity criterion.