

УДК 539.43: 669.14

Канд. техн. наук С. А. Беженев¹, В. Ю. Коцюба²,
С. Н. Пахолка², канд. техн. наук А. И. Беженев¹

¹Запорожский национальный технический университет, ²ОАО «Мотор Сич», г. Запорожье

К ВОПРОСУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Представлены результаты сравнительного анализа эффективности экспериментального определения работоспособности конструкционной стали по разным методикам.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, работоспособность, долговечность, предел выносливости, вероятность разрушения.

Введение

В настоящее время работоспособность конструкционных материалов в условиях действия циклических нагружений характеризуется двумя основными параметрами: максимальным безопасным напряжением, при котором материал не разрушается до базы испытаний – пределом выносливости, а также числом циклов, в течение которого материал не разрушается на заданном уровне амплитуды напряжений цикла – долговечностью. Ввиду отсутствия на сегодняшний день законченной общепринятой теории усталости, основным способом определения указанных параметров есть эксперимент. Задачей последнего является построение наклонной ветви кривой усталости, по которой осуществляют прогнозирование долговечности N на заданном уровне напряжений σ_a , и определение горизонтального участка кривой усталости, который характеризует значение предела выносливости σ_{-1} .

К настоящему времени разработано достаточно много методов и методик построения кривой усталости [1–6], которую описывают двухпараметрическим уравнением

$$\sigma_a^m \cdot N = \text{const}, \quad (1)$$

где переменными величинами являются число циклов N до разрушения и среднее напряжение цикла σ_a .

В последнее время все большее внимание исследователей уделяется вопросу разработки ускоренных методов [7] определения характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов по результатам испытаний малых выборок изделий. Однако все они не обеспечи-

вают достаточную точность и достоверность полученных результатов.

В работах [5–12], разработаны основные положения методики оценки работоспособности металлических материалов, основанной на научной концепции усталости, согласно которой все поле экспериментальных данных представляется как семейство кривых усталости конкретных образцов, проведенных из общего полюса под разными углами к оси напряжений [12]. С этих позиций формула (1) рассматривается как трехпараметрическое уравнение, в котором переменной величиной является также показатель степени m , характеризующий свойства материала, полученные в процессе производства.

Целью данной работы является сравнительный анализ эффективности методик ускоренного определения работоспособности конструкционных материалов, основанных на действующих нормативных материалах и на новой концепции исследования процесса усталости. Сравнение проводилось на примере обработки по разным методикам результатов испытаний на многоцикловую усталость малой выборки образцов из стали 45.

Материал, методики и результаты испытаний на усталость

Материал – сталь 45 в состоянии поставки.

Химический состав сплава – в соответствии со стандартом ГОСТ 1050-74.

Термообработка – нормализация.

Микроструктура – перлитные колонии в ферритной матрице.

Предел прочности – $\sigma_g = 620$ МПа.

Заготовка – пруток диаметром 20 мм.

Рабочая часть образца – типа II диаметром 7,5 мм согласно [4].

Частота колебаний при испытании на усталость – 300 Гц ± 5 %.

Схема испытаний – изгиб консольный с симметричным циклом.

Условия испытаний – на воздухе при температуре 293 К.

База испытаний – 10⁷ циклов.

Стандартная методика обработки результатов испытаний на усталость заключалась в построении регрессионной кривой усталости и определении предела выносливости согласно рекомендациям, изложенным в [4, 5]. При этом уравнение кривой усталости (1) представлялось в двойных логарифмических координатах в виде

$$\lg \sigma_a = -\frac{1}{m} \cdot \lg N + \lg C. \quad (2)$$

Методика, основанная на рассмотрении уравнения (1) как трехпараметрического, предусматривает, что для построения кривой усталости в двойных логарифмических координатах необходимо определить три параметра: координаты полюса, границы области многоциклового усталости, а также угол наклона кривой усталости, характеризуемый значением $\arctg m$. В этом случае уравнение кривой усталости в двойных логарифмических координатах представляется в виде [12]:

$$\lg \sigma_a = \lg \sigma_p - \frac{1}{m} \cdot (\lg N - \lg N_p), \quad (3)$$

где N_p и σ_p – координаты полюса диаграммы усталости.

Малая выборка в количестве 12 образцов испытывалась на многоцикловую усталость согласно стандарту [4]. Схема и результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Протокол испытаний на усталость образцов из стали 45

№ п/п	σ_a	$\lg \sigma_a$	$N \cdot 10^{-6}$, циклов	$\lg N$
1	370	2,5682	0,30	5,4771
2	340	2,5315	1,08	6,0334
3	320	2,5052	0,62	5,7924
4	300	2,4771	4,00	6,6021
5*	280	2,4472	10,0	7,0000
6	290	2,4624	1,34	6,1271
7	310	2,4914	1,58	6,1987
8	330	2,5185	0,65	5,8129
9*	270	2,4314	10,0	7,0000
10*	280	2,4472	8,00	6,9031
11*	300	2,4771	10,0	7,0000
12*	290	2,4624	7,11	6,8519

*Примечание: образец не разрушился

Обработка результатов испытаний по стандартной методике

На рис. 1 графически представлена схема испытаний и результаты обработки экспериментальных данных в соответствии с рекомендациями, приведенными в нормативных материалах [4, 5]. Порядковый номер означает последовательность испытаний.

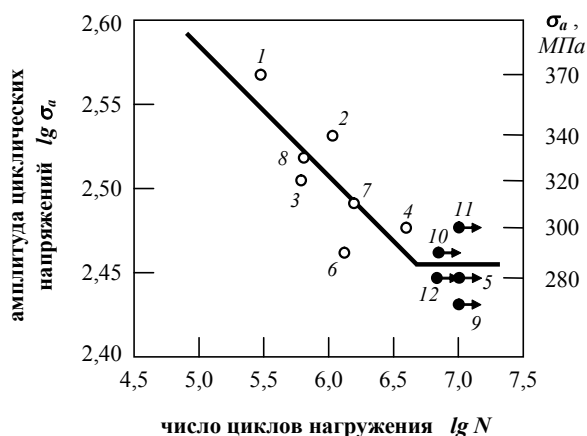


Рис. 1. Результаты испытаний и кривая усталости образцов из стали 45

Положение левой ветви кривой усталости в соответствии со стандартом [4] определяли по методу наименьших квадратов. Опытные данные из таблицы 1 описывали линейной зависимостью

$$y = a \cdot x + b, \quad (4)$$

где $x = \lg N$ и $y = \lg \sigma_a$. Коэффициенты прямой регрессии определялись согласно [13]. В результате регрессионное уравнение медианной кривой усталости имеет вид:

$$\lg \sigma_a = -0,07755 \cdot \lg N + 2,9735. \quad (5)$$

Область предела выносливости ориентировочно прояснилась после испытания образца № 5, но его окончательное значение $\sigma_{-1} = 285$ МПа установлено только после испытания образца № 12.

Обработка результатов испытаний с учетом полюса диаграммы усталости

В проведенных ранее исследованиях [8–11] показано, что координаты полюса кривых усталости для стали 45 принимают значения: $\lg N_p = 1,778$; $\lg \sigma_p = 3,021$. В соответствии с данными работы [2] начало области многоциклового усталости для сплавов на основе железа составляет $N_k = 2 \cdot 10^5$ циклов, что в логарифмической шкале

соответствует значению $\lg N_k = 5,301$. Расчетное значение абсциссы точки перегиба кривой усталости для всех сплавов, имеющих горизонтальный участок кривой, согласно [14], составляет $\lg N_G = 6,301$.

Поскольку коэффициент m рассматривается как величина стохастическая, то для ее экспериментального определения, согласно стандарту [4], можно рассчитать необходимое количество образцов в зависимости от предельной относительной ошибки Δ статистических параметров для доверительной вероятности $P = 1 - \alpha/2$, где α – вероятность ошибки первого рода. Минимальное количество образцов для граничных значений $\alpha = 0,1$; $\Delta_{\bar{m}} = 0,1$; $\Delta_{\bar{s}} = 0,5$ и коэффициента вариации $v = 0,1$ определяется из соотношений:

$$n \geq \frac{v^2}{\Delta_{\bar{m}}^2} \cdot Z_{1-\alpha/2}^2 = 2,7 \quad \text{и}$$

$$n \geq 1,5 + \frac{1}{2\Delta_{\bar{s}}^2} \cdot Z_{1-\alpha/2}^2 = 6,9, \quad (6)$$

где $\Delta_{\bar{m}}$ – относительная ошибка при оценке среднего значения; $\Delta_{\bar{s}}$ – относительная ошибка при оценке среднего квадратичного отклонения; $Z_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормированного нормального распределения.

Таким образом, для обеспечения принятой точности рассеивания значений коэффициента m необходимое количество образцов $n' = 7$. С учетом дополнительных испытаний для уточнения значения напряжения, соответствующего точке перегиба кривой усталости, общее число образцов для испытаний на усталость $n = 10$.

Значения коэффициентов m для разрушенных в ходе испытаний образцов рассчитывались на основании уравнения (3) по данным таблицы 1 и принятым значениям координат полюса из соотношения:

$$m_i = \frac{\lg N_i - \lg N_p}{\lg \sigma_p - \lg \sigma_{ai}}. \quad (7)$$

Результаты статистической обработки полученного вариационного ряда значений m показаны на рис. 2. Сплошная наклонная линия соответствует медианному значению коэффициента \bar{m} кривой усталости и описывается уравнением

$$\lg \sigma_a = -0,12137 \cdot \lg N + 3,2368, \quad (8)$$

коэффициенты которого на основании уравнения (3) определены из соотношений:

$$a = -\frac{1}{\bar{m}} = -0,12137; \quad b = \lg \sigma_p + \frac{1}{\bar{m}} \cdot \lg N_p = 3,2368.$$

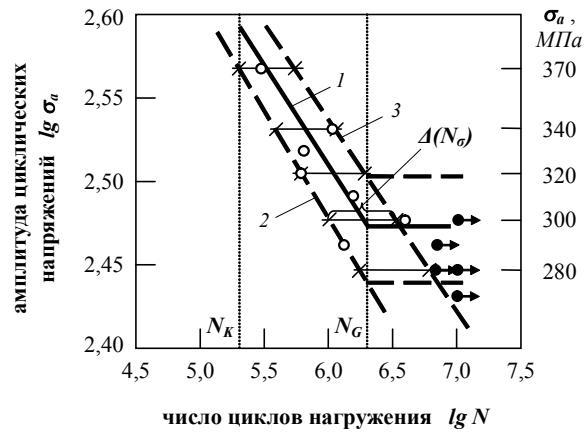


Рис. 2. Вероятностные кривые усталости образцов из стали 45:
1 – $P = 0,50$; 2 – $P = 0,05$; 3 – $P = 0,95$

Пунктирные линии, соответствующие минимальному m_{\min} и максимальному m_{\max} значениям коэффициента m , ограничивают область рассеивания результатов эксперимента с 95 %-ной вероятностью. Предел выносливости для заданной вероятности разрушения определяется из уравнения (8) при условии $N = N_G$, где $\lg N_G = 6,301$.

Работоспособность материала в условиях многоциклового усталости с использованием полюса кривых усталости оценивается по максимально допустимому напряжению σ_G (эквивалент предела выносливости) и по соответствующему ему числу циклов до разрушения N_G . Для ответственных деталей эти параметры оцениваются по кривой усталости, соответствующей нижней границе (m_{\min}) рассеивания результатов испытаний. Для неотчетственных деталей аналогичное напряжение может быть оценено по медианной кривой усталости. Оценка точности прогнозирования долговечности на любом заданном уровне напряжений σ_a осуществляется по соответствующим значениям размаха $\Delta(N_{\sigma})$, определяемым разностью долговечностей, соответствующих верхней (m_{\max}) и нижней (m_{\min}) границам рассеивания результатов испытаний. Значения опреде-

ляемых в рассматриваемом примере параметров, характеризующих работоспособность материала в условиях многоциклового усталости, приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Значения параметров работоспособности материала образцов исследуемой выборки

Параметры	m	σ_G , МПа	$\Delta(N_\sigma)$, млн. циклов
средние	8,240	297	2,578
минимальные	7,764	274	5,12
максимальные	8,715	317	1,358

Обсуждение полученных результатов и выводы

Проведенные исследования показали, что обработка по стандартной методике данных испытаний малых выборок образцов не позволяет оценить точность полученных результатов статистическими методами. В этом случае положение наклонной ветви кривой усталости, описываемой регрессионным уравнением (5), условно, так как сильно зависит от случайной статистики малой выборки образцов, в которой каждое испытание в значительной степени влияет на коэффициенты линии регрессии. Оценка горизонтального участка еще более условна. Считается, что полученные при такой обработке результаты, соответствующие 50 %-ной вероятности разрушения ($p = 0,5$), хотя наклонная и горизонтальная части кривой усталости в общем случае отвечают разным вероятностям разрушения. При таком подходе коэффициент m практического значения в определении характеристик сопротивления усталости не имеет и поэтому не рассчитывается. Следует также отметить, что результаты обработки экспериментальных данных испытаний малых выборок по стандартной методике в значительной степени зависят от опыта исследователей, что обуславливает большой разброс значений характеристик сопротивления усталости, полученных разными исследователями.

Использование коэффициента m в уравнении кривой усталости в качестве основного стохастического параметра, характеризующего способность материала сопротивляться усталости, позволяет перевести нестатистический эксперимент по испытанию на усталость образцов малой выборки в категорию статистического. Это дает возможность применить статистический метод обработки результатов испытаний малой выборки образцов, что позволяет математическим методом оценивать погрешность определения параметров, характеризующих работоспособность материала в условиях циклических нагружений.

При этом уравнение кривой усталости (8) более устойчиво, чем уравнение (5), описывает положение наклонного участка, поскольку случайно определенные значения долговечности образцов в ограниченном эксперименте в меньшей степени влияют на медианное значение коэффициента m .

Следует также отметить, что повышение эффективности оценки работоспособности материалов с применением методики, основанной на концепции существования общего полюса кривых усталости, происходит за счет возможности определения граничных вероятностных кривых усталости, что позволяет при определении значения предела выносливости не доводить испытания до установленной базы. При этом правомерно прекращать испытание образцов при напряжениях, близких к значению предела выносливости за пределами верхней границы рассеивания экспериментальных данных, что существенно сокращает время испытаний. В рассматриваемом примере экономия времени испытаний составляет 15 часов (т. е. 35 % общего времени испытаний).

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что:

1. Существующая методика ускоренного определения работоспособности конструкционных материалов не обеспечивает требуемую точность полученных результатов и допускает неоднозначность в оценке работоспособности материала изделий.
2. Методика обработки данных испытаний малых выборок образцов с учетом полюса диаграммы усталости позволяет количественно описать рассеивания значений основных параметров, характеризующих работоспособность материала в условиях многоциклового усталости.

Перечень ссылок

1. Вейбул В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбул ; пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1964. — 275 с.
2. Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев — М. : Металлургия, 1975. — 456 с.
3. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний / Л. М. Школьник ; справочник. — М. : Металлургия, 1978. — 304 с.
4. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость — М. : Изд-во стандартов, 1980. — 32 с.
5. Трошенко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. Трошенко, Л. А. Соновский ; справочник в 2-х ч. — К. : Наук. думка, 1987. — 1303 с.
6. Вагапов Р. Д. Вероятностно-детерминистс-

- кая механика усталости / Р. Д. Вагапов. — М. : Наука, 2003. — 254 с.
7. Олейник Н. В. Ускоренные испытания на усталость / Н. В. Олейник, С. П. Скляр — К. : Наук. думка, 1985. — 304 с.
 8. Беженев С. А. К вопросу оценки характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов / [С. А. Беженев, А. И. Беженев, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка] // Вестник двигателестроения. — 2004. — № 4. — С. 66–71.
 9. Беженев С. А. Некоторые аспекты теории усталостного разрушения металлических материалов / С. А. Беженев // Deformation & Fracture of materials — DFM2006 : Book of articles, ed. by Yu.K.Kovneristiy et al. — Moscow : Interkontakt Nauka, 2006. — С. 58–61.
 10. Беженев С. А. Методика экспресс-оценки характеристик сопротивления многоциклового усталости титановых сплавов / С. А. Беженев // Вестник двигателестроения. — 2008. — № 2. — С. 141–145.
 11. Беженев С. А. К вопросу ускоренного определения характеристик сопротивления усталости сплавов на основе никеля / С. А. Беженев, А. И. Беженев // Надійність і довговічність машин і споруд. — 2008. — Вип. 31. — С. 37–42.
 12. Беженев С. А. О некоторых методологических проблемах теории усталостного разрушения конструкционных материалов / С. А. Беженев // Надійність і довговічність машин і споруд. — 2008. — Вип. 30. — С. 6–14.
 13. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский — М. : Наука, 1969. — 511 с.
 14. ГОСТ 25.504-82 Расчеты испытания на прочности. Методы расчета характеристик сопротивления усталости — М. : Изд-во стандартов, 1982. — 182 с.

Поступила в редакцию 05.09.2010

Беженев С.О., Коцюба В.Ю., Пахолка С.М., Беженев О.І. До питання ефективності експериментального визначення працездатності конструкційного матеріалу в умовах багатоциклової втоми

Представлено результати порівняльного аналізу ефективності експериментального дослідження працездатності конструкційної сталі за різними методиками.

Ключові слова: *багатоциклова втома, працездатність, довговічність, границя витривалості, імовірність руйнування.*

Bezhenov S., Kotsuba V., Pakholka S., Bezhenov A. To the problem of the efficiency of experimental determining the work ability of the structural material under the high-cyclic fatigue

The results of comparative analyzing of the efficiency of experimental determining of the work ability of structural steel by the various methods have been presented.

Key words: *high-cyclic fatigue, work ability, durability, endurance limit, probability of fracture.*