

Оценка выносливости элементов конструкции на стадии проектирования

Б. Ф. Федоренко, В. С. Лукьянов

ОАО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина

Показана возможность оценки выносливости (многоциклового усталости) элемента конструкции с учетом его геометрии, свойств материала, технологии изготовления и вида нагружения. Получена аналитическая зависимость, в которой параметры, характеризующие выносливость элемента конструкции, представлены не отдельно, а комплексно (в виде безразмерных величин). Проведена численная реализация метода и полученные результаты сопоставляются с приведенными в литературных источниках.

Ключевые слова: элемент конструкции, образец, лопатка, выносливость (многоцикловая усталость), безразмерные величины, многомерный регрессионный анализ.

Введение. Одной из наиболее важных задач, стоящих перед конструкторами, является оценка выносливости (многоциклового усталости) на этапе проектирования конструкции. Известные способы решения этой задачи, полученные с использованием физического [1], статистического [2] и феноменологического [3] методов, не обеспечивают возможности учета в широком диапазоне изменения геометрии, свойств материала, технологии изготовления и вида нагружения элемента конструкции. В данной работе использован известный метод анализа размерностей [4], который позволяет учитывать влияющие на выносливость элемента конструкции параметры не отдельно, а в совокупности, сгруппировав их в безразмерные сочетания (комплексы π_i). Из этих комплексов формируется аналитическая зависимость (далее – зависимость), по которой оценивается выносливость элемента конструкции.

Результаты исследований. Параметры для разработки зависимости выбираются исходя из известных физических представлений о выносливости элементов конструкции (в данном случае из металлических материалов) при циклическом нагружении. Число выбранных параметров может оказывать влияние на точность оценки выносливости элементов конструкции. Для получения зависимости рассматриваются результаты исследования на выносливость при деформации изгиба и растяжения–сжатия стандартных [5] и нестандартных образцов. Последние по некоторым геометрическим параметрам отличались от требований [5].

Поскольку исследование образцов проводилось при циклическом нагружении, в перечень введены параметры, используемые в дифференциальном уравнении колебания стержня [6]: жесткость EI (E – модуль упругости материала, I – момент инерции сечения элемента конструкции в месте действия максимальных напряжений); удельный вес материала $\gamma = \rho g$ (ρ – плотность материала, g – ускорение свободного падения); длина колеблющейся части элемента конструкции l ; площадь сечения S элемента конструкции в месте действия максимальных напряжений.

Существенным фактором, влияющим на характеристики выносливости, является структура материала, обуславливающая способность сопротивляться прикладываемой нагрузке. Принято, что микротрещина при циклическом нагружении зарождается при наличии в локальном объеме пластической деформации [7, 8], поэтому в перечень параметров введены предел текучести σ_T и предел прочности σ_B , так как развитие микротрещины происходит с изменением параметров, определяющих структуру материала [8] (внутренней энергии), в границах от предела текучести (появление микротрещины) до предела прочности (появление макротрещины) [9]. В перечень параметров введен также предел выносливости σ_{-1} при базовом числе циклов нагружения, $N_6 = \tau\nu$ (τ – продолжительность испытания, ν – частота нагружения).

В неявном виде взаимосвязь между перечисленными параметрами можно записать следующим образом. При деформации изгиба:

$$F_1(\sigma_{-1}, EI, l, \gamma, S, \sigma_B, \sigma_T, N_6) = 0; \quad (1)$$

при деформации растяжения–сжатия:

$$F_2(\sigma_{-1}, ES, \rho, g, \Delta l, \sigma_B, \sigma_T, N_6) = 0, \quad (2)$$

где ES – жесткость и Δl – удлинение (характеристики, аналогичные EI и l при деформации изгиба).

С использованием метода анализа размерностей [4] выражения (1) и (2) преобразуются соответственно в (3) и (4):

$$F_3(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0; \quad (3)$$

$$F_4(\pi_5, \pi_6, \pi_3, \pi_4) = 0, \quad (4)$$

где $\pi_1 = \frac{\sigma_{-1}l^4}{EI}$, $\pi_5 = \frac{\sigma_{-1}\Delta l^2}{ES}$ – комплекс напряженности – соотношение между внешней нагрузкой и внутренней упругой силой при деформации изгиба (π_1) и деформации растяжения–сжатия (π_5); $\pi_2 = \frac{EI}{\gamma l^3 S}$, $\pi_6 = \frac{\gamma \Delta l^3}{ES}$

– комплекс динамического воздействия – соотношение между внутренней упругой силой и силой инерции при деформации изгиба (π_2) и деформации растяжения–сжатия (π_6); $\pi_3 = \sigma_B/\sigma_T$ – энергетический комплекс – соотношение напряжений, определяющих зарождение и развитие трещины; $\pi_4 = N_6$ – кинематический комплекс – число циклов нагружения.

Взаимосвязь между безразмерными комплексами в инженерных расчетах часто представляется в виде степенного ряда, при этом рассматривается только первый член ряда [4]. Тогда из (3) и (4) получим: при деформации изгиба

$$\pi_1 = C_1(\pi_2)^e(\pi_3)^h; \quad (5)$$

при деформации растяжения–сжатия

$$\pi_5 = C_2(\pi_6)^m(\pi_3)^n \quad (6)$$

(для упрощения вычислений в зависимостях (5), (6) принято $\pi_4 = N_6 = \text{const}$).

Величины коэффициентов C_1, C_2, e, h, m, n вычислялись с использованием метода многомерного регрессионного анализа путем обработки результатов исследования выносливости различных образцов [10–38]. Механические свойства материалов ($E, \gamma, \sigma_B, \sigma_T$) принимались по справочным данным. Геометрические параметры исследуемых образцов (отношение длины l к диаметру рабочей зоны d для круглых образцов диаметром 4–160 мм и отношение длины l к ширине b для плоских образцов толщиной 0,63–4 мм) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1
Геометрические параметры исследуемых образцов

Вид деформирования образцов	l/d	l/b
Растяжение–сжатие	9–32	–
Изгиб	8–9	3,0–7,5

При вычислении значений комплексов π_5 и π_6 вместо величины Δl использовалась l , так как в условиях растяжения–сжатия она зависит от длины образца, находящейся между захватами испытательной машины. При статистической обработке результатов использовались обратные величины комплексов π_5 и π_6 .

С учетом вида деформирования, классифицированного согласно [39], величины комплексов для рассматриваемых образцов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Величины комплексов исследуемых образцов

Вид деформирования образцов	Диапазон величины комплекса					
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6
Поперечный изгиб в одной плоскости (консольное закрепление)	2207... 47110	1690... 5173	1,03... 2,06	$> 10^7$	–	–
Чистый изгиб при вращении	0,81... 340	19540... 1698680	1,08... 2,95	$> 10^7$	–	–
Поперечный изгиб при вращении силовой плоскости (консольное закрепление)	1580... 2330	4600... 5200	2,02... 2,67	$> 10^7$	–	–
Поперечный изгиб при вращении (консольное закрепление)	0,19... 18,84	3710... 284070	1,18... 1,65	$> 10^7$	–	–
Растяжение–сжатие	–	–	1,05... 2,21	$> 10^7$	0,360... 0,024	$3,76 \cdot 10^{-5}$... $3,5 \cdot 10^{-7}$

Графическое представление результатов испытаний образцов на изгиб для зависимости (5) и на растяжение–сжатие для зависимости (6) при равенстве единице всех коэффициентов (рис. 1 и 2) позволило сгруппировать полученные данные (табл. 3) по следующим различиям. Для деформации изгиба – по виду деформирования: поперечный изгиб в одной плоскости (консольное закрепление); чистый изгиб при вращении и поперечный изгиб при вращении силовой плоскости (консольное закрепление); чистый изгиб при вращении (испытания при высокой температуре); поперечный изгиб при вращении (консольное закрепление). Для деформации растяжения–сжатия – по условиям закрепления: рабочий участок не граничит с захватами испытательной машины; рабочий участок граничит с захватами испытательной машины.

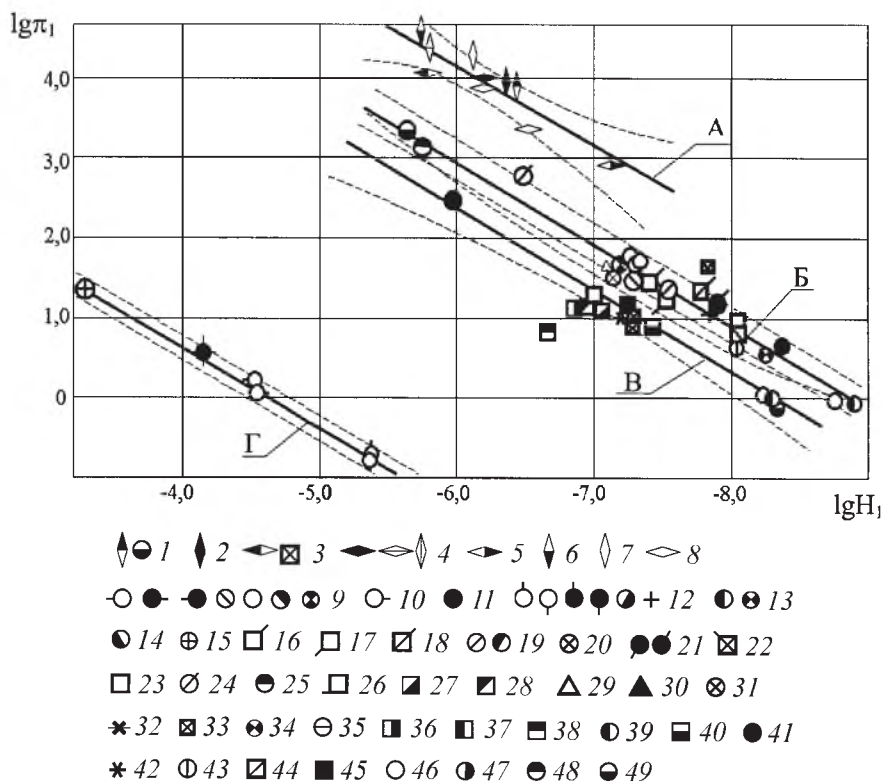


Рис. 1. Зависимость π_1 от H_1 , построенная по результатам исследования образцов при деформации изгиба: $T = 20^\circ\text{C}$ (1 – АМг6 [17, 28], 2 – Д20 [17], 3 – ВТ8 [20, 24], 4 – МЛТ1 [22], 5 – 20Х15Н3МА [21], 6 – ОТ4-1 [11], 7 – АМг6-БМ [11], 8 – ВД17 [19], 9 – сталь 45 [10, 12, 14, 15, 23, 26], 10 – 40ХНМА [12], 11 – сталь 35 [25], 12 – сталь 40Х [14, 16, 26], 13 – высокопрочный чугун [10, 23], 14 – АВ [23], 15 – 34ХН1М [27], 16 – 12Х1МФ [13], 17 – 15Х1М1Ф [13], 18 – 1Х18Н12Т [13], 19 – сталь 50 [14], 20 – сталь 40 [14], 21 – 1Х17Н2Ш [16], 22 – ЭИ612 [16], 23 – ЭИ437Б [16], 24 – ЭИ726 [18], 25 – Х18Н10Т [28]); $T = 300^\circ\text{C}$ (26 – 12Х1МФ, 27 – 1Х18Н12Т, 28 – 15Х1М1Ф, 29 – ВТ8 [13, 24]); $T = 400^\circ\text{C}$ (30 – ВТ8, 31 – ВТ3-1 [24]); $T = 450^\circ\text{C}$ (32 – ВТ8 [24]); $T = 550^\circ\text{C}$ (33 – ЖС6-К, 34 – ЭИ893, 35 – ЭИ787 [30]); $T = 600^\circ\text{C}$ (36 – 12Х1МФ, 37 – 1Х18Н12Т, 38 – 15Х1М1Ф, 39 – ЖС6-К, 40 – ЭИ612 [13, 16, 29]); $T = 650^\circ\text{C}$ (41 – ЭИ726, 42 – ЖС6-К, 43 – ЭИ893, 44 – ЭИ787 [18, 30]); $T = 700^\circ\text{C}$ (45 – ЭИ473Б [16]); $T = 800^\circ\text{C}$ (46 – ЖС6-К [29]); $T = 900^\circ\text{C}$ (47 – ЖС6-К [29]); $T = 950^\circ\text{C}$ (48 – ЖС6-К [29]); $T = 1000^\circ\text{C}$ (49 – ЖС6-К [29]). А, Б, В, Г – группы данных исследования (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Величины коэффициентов зависимостей (5) и (6)

Группа данных исследования	Вид деформирования образцов	Величина коэффициента			
		$\frac{C_1}{C_2}$	$\frac{e}{m}$	$\frac{h}{n}$	корреляции
А	Поперечный изгиб в одной плоскости (консольное закрепление)	$\frac{1,32 \cdot 10^{10}}{-}$	$\frac{-1,765}{-}$	$\frac{0,127}{-}$	0,85
Б	Чистый изгиб при вращении и поперечный изгиб при вращении силовой плоскости (консольное закрепление)	$\frac{8,9 \cdot 10^8}{-}$	$\frac{-1,400}{-}$	$\frac{-1,223}{-}$	0,95
В	Чистый изгиб при вращении (испытания при высокой температуре)	$\frac{2,19 \cdot 10^8}{-}$	$\frac{-1,318}{-}$	$\frac{-0,734}{-}$	0,85
Г	Поперечный изгиб при вращении (консольное закрепление)	$\frac{573,66 \cdot 10^2}{-}$	$\frac{-0,988}{-}$	$\frac{-0,173}{-}$	0,95
Д	Растяжение-сжатие, рабочий участок конструкции не граничит с захватами испытательной машины	$\frac{-}{0,26 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{-}{0,828}$	$\frac{-}{0,183}$	0,90
Е	То же, рабочий участок конструкции граничит с захватами испытательной машины	$\frac{-}{5,75 \cdot 10^9}$	$\frac{-}{1,745}$	$\frac{-}{1,705}$	0,90

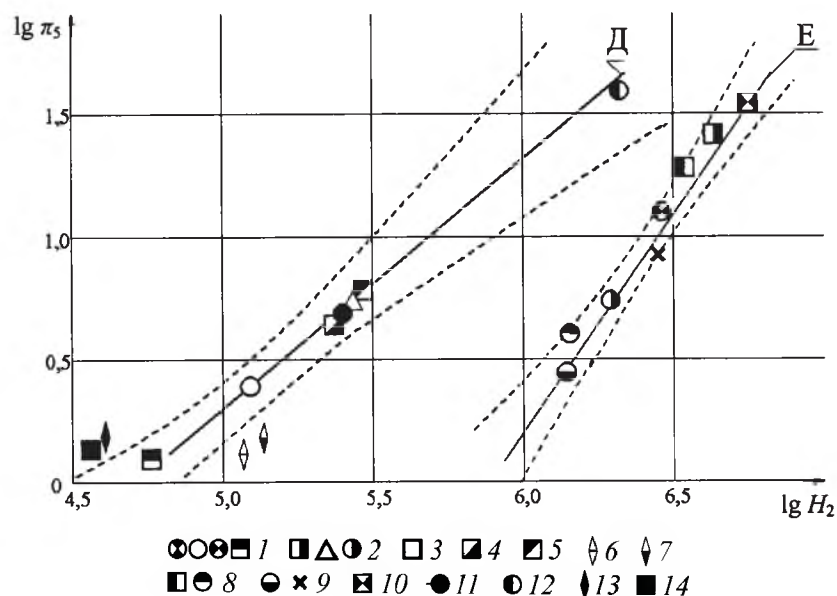


Рис. 2. Зависимость π_5 от H_2 , построенная по результатам исследования образцов при деформации растяжения-сжатия: $T = 20^\circ\text{C}$ (1 – сталь 45 [31, 35, 37], 2 – Д16Т [32, 37], 3 – ЭИ826 [32], 4 – 1Х17Н2П [32], 5 – 40Х [32], 6 – МА2-1 [33], 7 – МА12 [33], 8 – ОТ4-1 [37], 9 – ВТ22М [37], 10 – Х18Н10Т [33]); $T = 600^\circ\text{C}$ (11 – ЭИ612, 12 – ВЖЛ12У [32, 36]); $T = 700^\circ\text{C}$ (13 – ЖСЗДК [34]); $T = 850^\circ\text{C}$ (14 – ЖСЗДК [34]). Д, Е – группы данных исследования (табл. 3).

Коэффициенты в (5) и (6) определялись в данном случае с использованием метода многомерного регрессионного анализа (табл. 3). Графические зависимости комплексов π от величин H при деформации изгиба и деформации растяжения–сжатия построены в логарифмических координатах $\lg \pi_1$; $\lg H_1 = \lg(C_1(\pi_2)^e(\pi_3)^h)$ и $\lg \pi_5$; $\lg H_2 = \lg(C_2(\pi_6)^m(\pi_3)^n)$ при $C_1 = C_2 = 1$ соответственно на рис. 1 и 2, где сплошные линии – линии регрессии, пунктирные – границы доверительных интервалов с вероятностью 0,95. Таким образом, с помощью метода анализа размерностей получена аналитическая зависимость для оценки выносливости стандартных и нестандартных образцов при многоцикловом нагружении. Эта зависимость использовалась для оценки выносливости рабочих лопаток осевых турбомашин (далее – лопаток).

Известно, что напряженное состояние элемента конструкции в значительной степени обусловлено параметрами его геометрии – совокупностью концентраторов напряжений в предполагаемом месте действия максимальных напряжений при нагружении. По сравнению с образцами геометрия лопаток имеет характерные отличительные особенности – специфический профиль поперечного сечения и изменение его положения по высоте лопатки (ее “закрученность”). Для учета указанных различий в (1) дополнительно введены параметры: угол поворота концевой сечения пера относительно корневого $\Delta\varphi$; хорда в корневом сечении пера b ; длина пера лопатки l_1 ; радиусы входной $R_{вх}$, выходной $R_{вых}$ кромок и перехода $R_{пер}$ от пера к замку в корневом сечении пера; максимальная толщина пера в корневом сечении C_{max} . В результате получим

$$F_5(\sigma_{-1}, EI, l, \gamma, S, R_{вх}, R_{вых}, R_{пер}, C_{max}, \Delta\varphi, b, l_1, \sigma_v, \sigma_T, N_6) = 0. \quad (7)$$

С использованием анализа размерностей выражение (7) преобразуется так:

$$F_6(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_7, \pi_8) = 0, \quad (8)$$

где π_7 и π_8 – комплексы, учитывающие геометрические особенности лопатки: $\pi_7 = \frac{\Delta\varphi b}{2l_1}$ – комплекс, учитывающий степень “закрученности” пера

лопатки [40], $\pi_8 = \frac{C_{max} R_{пер}}{R_{вх} R_{вых}}$ – комплекс, учитывающий совокупность кон-

центраторов сечения пера в предполагаемом месте действия максимальных напряжений при нагружении.

С учетом вышепринятого $\pi_4 = N_6 = \text{const}$ выражение (8) преобразуется следующим образом:

$$\pi_1 = C_3(\pi_2)^a(\pi_3)^b(\pi_7)^d(\pi_8)^f. \quad (9)$$

Зависимость (9) использовали для обработки результатов испытаний на выносливость при поперечном изгибе в одной плоскости (консольное за-

крепление) лопаток, выпускаемых ОАО “Мотор Сич”. Геометрические параметры исследуемых лопаток (отношение характерных параметров лопаток в корневой и концевой части) приведены ниже:

$$\left(\frac{C_{\max}}{b}\right)_{\text{корн}} = 0,057 \dots 0,282; \left(\frac{C_{\max}}{b}\right)_{\text{конц}} = 0,032 \dots 0,182; \frac{S_{\text{конц}}}{S_{\text{корн}}} = 0,220 \dots 0,726.$$

Графическое представление результатов исследования для зависимости (9) при равенстве коэффициентов C_3, a, b, d, f единице показало разделение их на две группы. В первую группу вошли данные для лопаток, изготовленных из хромоникелевых сплавов, во вторую – из титановых сплавов.

Одной из возможных причин такого разделения можно считать то, что энергетическое состояние поверхностного слоя пера лопаток существенно различается. Перо лопаток первой группы формировалось путем электро-механической обработки и полирования (или фрезерования и ленточного шлифования), что обеспечило величину поверхностных остаточных сжимающих напряжений $\sigma_{\text{ост}} < 250$ МПа, второй группы – путем вальцевания и ультразвукового упрочнения, при этом $\sigma_{\text{ост}} > 300$ МПа.

Величины комплексов π для двух групп лопаток представлены в табл. 4. Величины коэффициентов C_3, a, b, d, f зависимости (9) вычислялись с помощью многомерного регрессионного анализа для каждой группы лопаток отдельно (табл. 5).

Т а б л и ц а 4

Величины комплексов исследуемых лопаток

№ группы лопаток	Диапазон величины комплекса				
	π_1	π_2	π_3	π_7	π_8
1	20,56...3527	26686...106600	1,13...1,54	0,03...0,13	13,1...88,7
2	2446...4000	14686...43700	1,06...1,20	0,06...0,13	41,56...150

Т а б л и ц а 5

Величины коэффициентов зависимости (9)

№ группы лопаток	Величина коэффициента					
	C_3	a	b	d	f	корреляции
1	6064	-0,7942	-1,3473	1,4649	-0,0452	0,99
2	89009	-0,8613	-2,2967	-1,0200	0,2376	0,94

Результаты исследований двух групп лопаток в виде графических зависимостей π_1 от величины H_3 в логарифмических координатах $\lg \pi_1; \lg H_3 = \lg(C_3(\pi_2)^a(\pi_3)^b(\pi_7)^d(\pi_8)^f)$ при $C_3 = 1$ представлены на рис. 3, где сплошные линии – линии регрессии, пунктирные – границы доверительных интервалов с вероятностью 0,95.

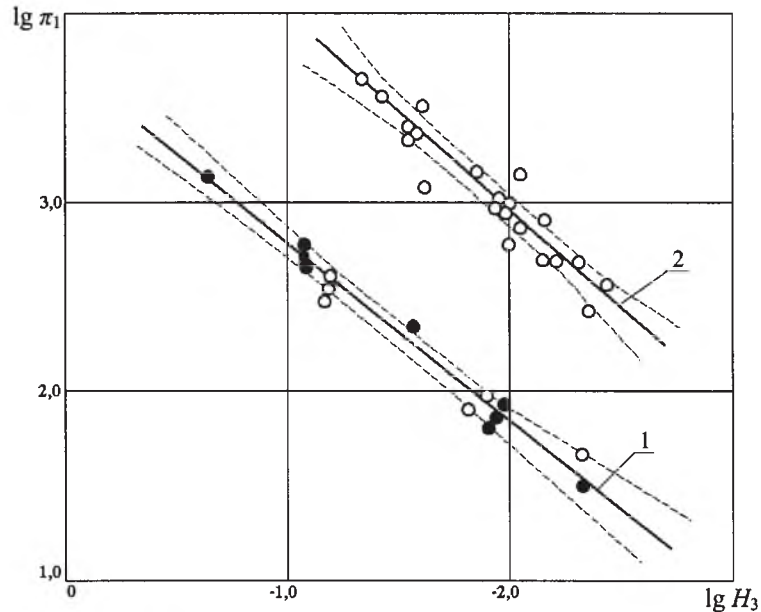


Рис. 3. Зависимость π_1 от H_3 , построенная по результатам исследования лопаток при поперечном изгибе в одной плоскости (консольное закрепление): \circ – лопатки компрессора, \bullet – лопатки турбины (1, 2 – группы исследуемых лопаток, табл. 5).

Таким образом, с использованием метода анализа размерностей получена аналитическая зависимость для оценки выносливости рабочих лопаток осевых турбомашин при многоцикловом нагружении.

Выводы

1. С применением метода анализа размерностей разработаны безразмерные комплексы, с помощью которых получена аналитическая зависимость для оценки выносливости элементов конструкции.

2. Показано практическое применение полученной зависимости для оценки выносливости простых (образцы) и сложных (рабочие лопатки осевой турбомшины) элементов конструкции.

Резюме

Показано можливість оцінки витривалості (багатоциклової втоми) елемента конструкції з урахуванням його геометрії, властивостей матеріалу, технології виготовлення та виду навантаження. Отримано аналітичну залежність, де параметри, що характеризують витривалість елемента конструкції, представлено не окремо, а комплексно (у вигляді безрозмірних величин). Проведено числову реалізацію методу і отримані дані зіставляються з наведеними в літературних джерелах.

1. Струшин Б. М. К теории легкого скольжения в кристаллах // Физика твердого тела. – 1964. – 6, № 3. – С. 1281 – 1293.

2. *Троценко В. Т.* Прочность металлов при переменных нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1978. – 178 с.
3. *Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник / Под ред. И. А. Биргера.* – М.: Машиностроение, 1968. – 831 с.
4. *Schenck H., Jr.* Theories of Engineering Experimentation. – New York; St. Louis; San Francisco; Toronto; London; Sydney: McGraw-Hill Book Company. – 250 p.
5. *ГОСТ 25.502-79.* Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость. – Введ. 01.01.81.
6. *Timoshenko S.* Vibration Problems in Engineering. – Toronto; New York; London: D. Van Nostrand Company Inc., 1955. – 315 с.
7. *Ronay M.* Fatigue of high-strength materials // Fracture and Advanced Treatise. Vol. 3. Engineering Fundamentals and Environmental Effects. – New York; London: Academic Press, 1971. – P. 287 – 292.
8. *Yokobori T.* An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids. – Groningen: Wolters-Noordhoff Scientific Publications Ltd, 1968. – 335 p.
9. *Федоренко Б. Ф.* Оценка характеристик усталости рабочих лопаток компрессора вертолетного ГТД // Материалы конференции по ГТД для вертолетов, легких самолетов и вспомогательных силовых установок. – М.: ЦИАМ, 1983. – Вып. 2, № 1078. – С. 52 – 64.
10. *Крамаренко О. Ю., Куликовская О. В.* Зависимость между глубиной и длиной усталостной трещины, развивающейся в круглых образцах при изгибе // Пробл. прочности. – 1978. – № 2. – С. 21 – 26.
11. *Трапезон А. Г.* К методике испытания на выносливость тонколистовых материалов при плоском изгибе на высоких частотах нагружения // Там же. – 1977. – № 3. – С. 38 – 41.
12. *Белкин М. Я., Масол В. А., Саввина Н. М., Рулев В. И.* Выносливость валов из углеродистой и легированной сталей // Там же. – 1977. – № 3. – С. 109 – 113.
13. *Ищенко И. И., Зеленский В. Г., Погребняк А. Д. и др.* Сопротивление усталости жаропрочных сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 1Х18Н12Т при нормальной и повышенной температурах // Там же. – 1976. – № 10. – С. 97 – 100.
14. *Молчанов Л. Н.* Исследование ограниченной долговечности некоторых легированных и углеродистых сталей при чистом изгибе с вращением // Там же. – С. 101 – 106.
15. *Шульгинов Б. С.* Влияние предварительного циклического деформирования и деформационного старения на рассеяние энергии в стали 45 // Там же. – 1973. – № 5. – С. 28 – 31.
16. *Гетман А. Ф.* Влияние электрополирования на чувствительность некоторых сплавов к концентрации напряжений при усталости // Там же. – № 8. – С. 43 – 48.

17. Андреев Л. П., Новиков Н. В. Изменение выносливости некоторых легких сплавов при понижении температуры от комнатной до -269°C // Там же. – 1971. – № 11. – С. 45 – 47.
18. Грязнов Б. А., Каплинский Л. А., Троян И. А. Исследование влияния температуры, асимметрии и концентрации напряжений на усталость стали ЭИ-726 (1X14H1232BP1) // Там же. – № 9. – С. 113 – 115.
19. Аверченко П. А., Трескунов Б. А., Плескач В. М. Влияние металлических покрытий на предел выносливости алюминиевого сплава ВД-17 // Там же. – № 3. – С. 122 – 124.
20. Корневский Е. Я., Яценко В. К. Выбор рационального режима виброгалтовки при упрочнении деталей из титанового сплава ВТ-8 // Там же. – 1970. – № 11. – С. 106 – 110.
21. Яценко В. К., Корневский Е. Я., Иващенко Л. И. Повышение выносливости стали ДИ-1 в условиях прессовых соединений и коррозионной среды // Там же. – 1974. – № 12. – С. 96 – 98.
22. Гальперин М. Я., Глазунов М. Г., Данюшенков И. А. и др. Исследование сопротивления молибденового сплава МЛТ-1 и его сварных соединений // Там же. – 1974. – № 11. – С. 85 – 90.
23. Гальперин М. Я. Характеристика выносливости металлов на стадиях усталостного разрушения и различных базах испытания // Там же. – 1978. – № 5. – С. 22 – 35.
24. Брагин Д. Я., Логинов Н. З., Шканов И. Н. Влияние некоторых технологических факторов на усталостную прочность титановых сплавов // Там же. – 1971. – № 8. – С. 78 – 82.
25. Масол В. А., Белкин М. Я., Тарасова В. Н. Сопротивление усталости хрупких валов из углеродистой стали в связи с технологией обработки // Там же. – № 5. – С. 101 – 106.
26. Белкин М. Я., Черненко Н. Т., Рулев В. И., Слюсаренко В. Н. Усталостная прочность валов, резко охлажденных от температур нагрева ниже критических // Там же. – 1972. – № 4. – С. 89 – 93.
27. Масол В. А., Кудрявцев И. В., Белкин М. Я. и др. Усталостная прочность материала полых и сплошных крупных валов // Там же. – 1971. – № 3. – С. 86 – 91.
28. Покровский В. В. Исследование влияния чистоты и способа обработки поверхности на выносливость сталей 1X18H10T, X16H6 и сплава АМГ-6 при комнатной и низких температурах // Там же. – 1972. – № 4. – С. 102 – 104.
29. Синайский Б. Н., Погребняк А. Д., Ищенко И. И. О влиянии температуры испытания на усталостную прочность сплава ЖС6-К // Там же. – № 2. – С. 24 – 31.
30. Шлик Л. Р., Саввина Н. М., Шемеган Ю. М. Исследование усталостной прочности литейных материалов для лопаток турбокомпрессоров в интервале температур $450-650^{\circ}\text{C}$ // Там же. – 1974. – № 9. – С. 48 – 51.

31. Филатов Э. Я., Павловский В. Э., Панфилов Ю. А. Изучение накопления усталостного повреждения в зависимости от режима эксплуатационной нагруженности // Там же. – 1971. – № 3. – С. 10 – 14.
32. Троценко В. Т., Гетман А. Ф. Исследование влияния малых упруго-пластических деформаций на несущую способность образцов с концентраторами напряжений в условиях повторно-переменного нагружения // Там же. – 1972. – № 2. – С. 18 – 23.
33. Гринберг Н. М., Сердюк В. А., Яковенко Л. Ф. и др. Кинетика и механизм усталостного разрушения магниевых сплавов МА2-1 и МА12 // Там же. – 1977. – № 8. – С. 40 – 45.
34. Погребняк А. Д., Синайский Б. Н., Ящук Н. В., Палиенко Е. Я. Влияние температуры и вида напряженного состояния на выносливость жаропрочного литейного сплава ЖСЗДК // Там же. – 1985. – № 3. – С. 10 – 14.
35. Троценко В. Т., Хамаза Л. А., Мищенко Ю. Д. Исследование усталостной прочности образцов с концентраторами напряжений с учетом неупругих циклических деформаций // Там же. – 1978. – № 4. – С. 13 – 16.
36. Синайский Б. Н., Погребняк А. Д. О сопоставлении сопротивления усталости жаропрочных никелевых сплавов при изгибе и растяжении-сжатии // Там же. – 1979. – № 7. – С. 11 – 15.
37. Кузьменко В. А., Гришаков С. В. О влиянии высокой частоты нагружения на выносливость ряда конструкционных сплавов при низкой (-196°C) и комнатной температурах // Там же. – 1974. – № 10. – С. 31 – 36.
38. Гришаков С. В. Исследование выносливости нержавеющей сталей Х18Н10Т и 00Х20Н16АГ6 при высокочастотном нагружении в условиях низкой (-196°C) и комнатной температур // Там же. – С. 113 – 116.
39. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
40. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.

Поступила 15. 02. 2006