

Лыкова А.В., Ильиных А.В., Вильдеман В.Э. Прогнозирование циклической долговечности при малоцикловой усталости с использованием нелинейной модели Марко – Старки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 14–22. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.02

Lykova A.V., Ilinykh A.V., Wildemann V.E. Cycle life prediction under low cycle fatigue using nonlinear Marco – Starkey model. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 3, pp. 14-22. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.02



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.02

УДК 620.178.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ МАРКО – СТАРКИ

А.В. Лыкова, А.В. Ильиных, В.Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 июня 2022 г.
Одобрена: 07 сентября 2022 г.
Принята к публикации:
01 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

экспериментальная механика, малоцикловая усталость, одноосное нагружение, поврежденность, долговечность, закономерности механического поведения, модели накопления повреждений, блочное нагружение, конструкционные сплавы.

АННОТАЦИЯ

Исследован процесс деформирования и разрушения конструкционных сплавов при малоцикловой усталости в условиях одноосного нагружения с контролем по осевой деформации при сложной форме цикла и блочном нагружении. Полученные результаты экспериментальных исследований конструкционных сплавов использовались для оценки возможности использования нелинейной модели накопления повреждений Марко – Старки. Проведена обработка результатов циклических испытаний никелевого сплава при простой и сложной форме цикла. Подобрана комбинация показателей степени, входящих в нелинейную модель Марко – Старки, которая для случая малоцикловой усталости при сложной М-образной форме цикла позволила спрогнозировать долговечность, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными испытаний. Основной проблемой при использовании нелинейной модели Марко – Старки для прогнозирования циклической долговечности при М-образной форме цикла является наличие множества комбинаций показателей степени, позволяющих с одинаковой точностью осуществить прогноз циклической долговечности. Для определения возможности получения единственности решения предложено проведение комплекса испытаний при простом и блочном циклическом нагружении. Получены экспериментальные результаты о процессах деформирования и разрушения сплава алюминия Д16Т в условиях малоцикловой усталости при простых формах цикла с постоянными параметрами и блочном нагружении с переменными параметрами цикла в испытаниях на одноосное нагружение с контролем по осевой деформации. На основе полученных экспериментальных результатов по новой методике произведен подбор комбинаций коэффициентов степеней m , поиск которых осуществлялся в диапазоне показателей степеней от 0,2 до 10 с шагом 0,2. Сопоставление результатов прогнозирования по блокам, состоящим из трёх групп, позволило найти несколько комбинаций общих показателей степеней m по двум группам, которые присутствуют во всех блоках. Окончательный выбор пары коэффициентов осуществлялся из условия близости прогнозируемого значения параметра поврежденности к единице в первом (проверочном) блоке. Выбранные значения коэффициентов позволили осуществить прогноз долговечности при блочном малоцикловом нагружении с использованием нелинейной модели Марко – Старки.

© ПНИПУ

© Лыкова Анастасия Васильевна – м.н.с., e-mail: cem.lykova@gmail.com
Ильиных Артем Валерьевич – к.т.н., доц., e-mail: ilinih@yandex.ru
Вильдеман Валерий Эрвинович – д. ф.-м.н., проф., e-mail: wildemann@pstu.ru

Anastasiya V. Lykova – Junior Research, e-mail: cem.lykova@gmail.com
Artem V. Ilinykh – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ilinih@yandex.ru
Valery E. Wildemann – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: wildemann@pstu.ru



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

CYCLE LIFE PREDICTION UNDER LOW CYCLE FATIGUE USING NONLINEAR MARCO – STARKEY MODEL

A.V. Lykova, A.V. Ilinykh, V.E. Wildemann

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 July 2022
Approved: 07 September 2022
Accepted for publication:
01 November 2022

Keywords:

experimental mechanics, low-cycle fatigue, uniaxial loading, damage, fatigue life, regularities of the mechanical behavior, damage accumulation model, block loading, structural alloys.

ABSTRACT

The process of deformation and fracture of structural alloys under low-cycle fatigue in conditions of uniaxial loading with axial strain control under complex cycle shape and block loading has been studied. The obtained results of experimental studies of structural alloys were used to assess the possibility of using the nonlinear Marco – Starkey damage accumulation model. The processing of the nickel alloy cyclic tests results with a simple and complex form of the cycle has been carried out. A combination of exponents included in the non-linear Marco – Starkey model was selected which for the case of low-cycle fatigue with a complex M-shaped cycle made it possible to predict durability which is in good agreement with experimental test data. The main problem of using the nonlinear Marco – Starkey model for predicting cyclic durability with an M-shaped cycle is the presence of many combinations of exponents that allow predicting cyclic durability with the same accuracy. To determine the uniqueness of the solution it is proposed to carry out a set of tests under simple and block loading. Experimental results have been obtained on the processes of deformation, fracture of D16T aluminum alloy under low-cycle fatigue conditions under simple cycle forms with constant parameters, and block loading with variable cycle parameters in tests for uniaxial loading with axial strain control. Based on the obtained experimental results according to the new method combinations of the m degrees coefficients were selected, which was carried out in the range of exponents from 0.2 to 10 with a step of 0.2. Comparison of the forecasting results for blocks consisting of three groups made it possible to find several combinations of general exponents m for two groups that are present in all blocks. The final choice of a pair of coefficients was carried out on the condition that the predicted damage is close to unity in the first (test) block. The selected values of the coefficients made it possible to predict the durability under block low-cycle loading using the nonlinear Marco – Starkey model.

© PNRPU

Введение

Многие конструктивные элементы газотурбинных двигателей и других ответственных изделий работают в условиях длительного воздействия предельно высоких циклических нагрузок, которые могут привести к разрушению деталей с катастрофическими последствиями для двигателя [1–5]. Усталостным повреждением называется процесс, при котором свойства материала непрерывно снижаются при циклическом нагружении, а величина повреждения зависит от величины напряжения и деформации. При малоциклового усталости процесс накопления повреждений в материалах сложный, многоступенчатый и протекает на всех масштабных уровнях, приводя в конечном счете к макроразрушению образца [6]. Определению характеристик малоциклового усталости посвящено большое количество работ [7–17]. Развитие методов прогнозирования циклической долговечности привело к появлению большого количества моделей и критериев усталостного разрушения. Часто для малоциклового усталости используются деформационные и энергетические критерии усталостного разрушения. Критерии устанавливают зависимость между полной деформацией либо энергией деформирования и числом циклов до разрушения с учетом среднего напряжения, режима нагружения, концентрации напряжений и т.д. При малоциклового усталости возникают большие пластические деформации, которые в значительной степени влияют на усталостную

долговечность, поэтому во многих предлагаемых моделях в качестве параметра принимаются пластические деформации [18–23]. Одними из первых работ в исследовании деформационных критериев путем изучения малоциклового усталости были работы Мэнсона и Коффина [24]. Энергетические критерии, применяемые для режимов малоциклового усталости, основаны на энергии, рассеиваемой при деформации материала, или на работе, выполняемой при пластической деформации в каждом цикле нагружения [25–33]. Многие предлагаемые критерии базируются на концепции критической плоскости. Она основывается на экспериментальном наблюдении, что в металлических материалах усталостные трещины возникают и растут в определенных плоскостях. Однако подходы, связанные с концепцией критической плоскости, имеют недостаток: критическая плоскость не всегда совпадает с плоскостью, в которой параметр усталостной поврежденности принимает максимальное значение.

Часто для оценки усталостной долговечности применяется модель линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера. Модель является наиболее простой и предполагает линейную зависимость долговечности и доли поврежденности при любом уровне амплитуды напряжений. Так как вклад зарождения или распространения усталостной трещины в усталостную долговечность в большой степени зависит от свойств материала и условий нагружения, в экспериментальных данных отечественных и зарубежных исследователей линейная модель накопления

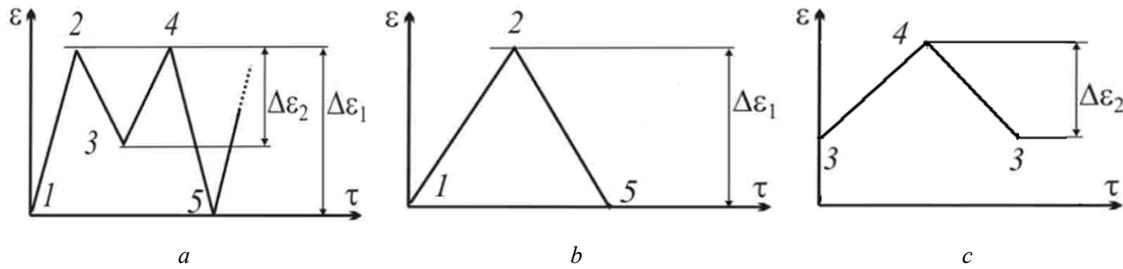


Рис. 1. Разложение M-образного цикла (a) на циклы простой треугольной формы $R=0$ (b) и $R=0,35$ (c)

Fig. 1. Decomposition of the M-shaped cycle (a) into cycles of a simple triangular shape $R=0$ (b) and $R=0,35$ (c)

повреждений редко подтверждается экспериментальными данными. Чтобы повысить точность, были предложены различные нелинейные модели накопления повреждений (Марко – Старки, Кортена – Долана, Марина, Гатс, Chaboche и другие) [34–41]. Марко и Старки [34] впервые предложили нелинейное правило повреждения, зависящее от нагрузки. Другие подходы учитывают влияние предела выносливости для измерения накопления повреждений [35; 37] при приложении многоуровневой нагрузки. Затем были предложены модели, основанные на модификации кривой S – N [36]. Эти методы более точны, чем линейное правило суммирования повреждений, но они требуют значительно большего количества экспериментальных данных для подбора необходимых параметров. Требуется больше исследований по этой теме для того, чтобы прогнозирование ресурса проводилось более точно.

1. Прогнозирование долговечности при сложной форме цикла

С целью анализа закономерностей процессов накопления повреждений и возможностей использования различных моделей накопления повреждений, рассмотрена одна из первых и самых простых гипотез, предложенной Марко и Старки [34]. Кривые поврежденности для любой по величине амплитуды деформаций описываются следующим соотношением:

$$D = \left(\frac{n}{N} \right)^{m_i} \quad (1)$$

где D – параметр поврежденности, n – количество циклов нагружения при определенном уровне деформаций, N – количество циклов до разрушения, m_i – показатель степени, зависящий от уровня деформаций или напряжений.

В случае ступенчатого нагружения, когда изменяется уровень деформаций, суммарная поврежденность вычисляется по следующей формуле [44]:

$$\sum_{k=1}^i D_k = \left[\frac{n_i}{N_i} + \left(\sum_{k=1}^{i-1} D_k \right)^{\frac{1}{m_i}} \right]^{m_i}, \quad (2)$$

где D_k – параметр поврежденности за i этапов нагружения.

Рассмотрена возможность применения нелинейной модели для анализа процессов накопления повреждений при цикле сложной формы. Используются экспериментальные данные жаропрочного никелевого сплава, предназначенного для изготовления дисков турбин авиационных двигателей [8], полученные в условиях малоциклового усталости при простых треугольных формах цикла с разными значениями амплитуд и коэффициентами асимметрии ($R = 0$ и $R = 0,35$), а также при сложной форме цикла. Сложный M-образный цикл рассматривался как сумма двух простых циклов треугольной формы (рис. 1).

Схематичное описание процесса накопления повреждений для цикла сложной M-образной формы представлено на рис. 2, где каждая кривая показывает изменение степени параметра поврежденности от числа наработки для каждой формы простого цикла. Уравнение $D_1 = (n/N)^{m_1}$ описывает изменение параметра поврежденности при треугольном цикле с коэффициентом асимметрии $R = 0$, а уравнение $D_2 = (n/N)^{m_2}$ описывает параметр поврежденности при треугольном цикле с коэффициентом асимметрии $R = 0,35$. Разрушение происходит при достижении суммарного значения параметра поврежденности единицы.

На основе экспериментальных данных испытаний на малоцикловую усталость никелевого сплава при простых формах цикла с разными значениями амплитуд осевых

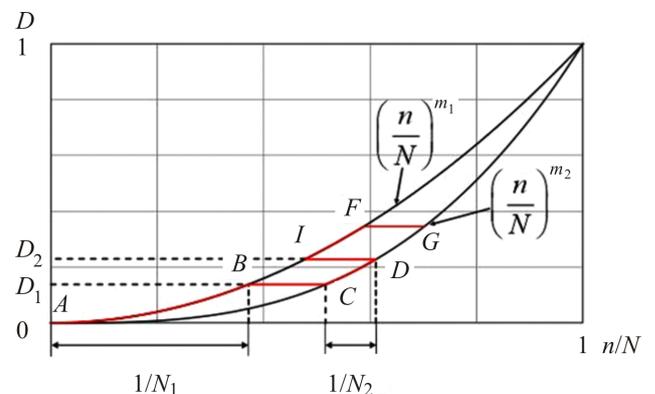


Рис. 2. Траектория накопления повреждений при M-образной форме цикла

Fig. 2. Damage accumulation trajectory of a complex cycle shape

Предложенные значения показателей степени m , экспериментальные и расчетные данные испытаний на малоцикловую усталость

Proposed values of exponents, experimental and calculated data of tests for low-cycle fatigue

Амплитуда деформаций ε_a , %	Экспериментальное количество циклов при $R = 0$ $N_{\text{экспер.}}$	Экспериментальное количество циклов при $R = 0,35$ $N_{\text{экспер.}}$	m_1	m_2	Экспериментальное число циклов для М-обр. формы нагружения $N_{\text{экспер.}}$	Прогнозируемое число циклов для М-обр. формы нагружения $N_{\text{прогноз.}}$
0,3	29 624	138 879	1,8	3,4	23 308	23 384
0,35	17 752	81 170	1,8	3,2	14 062	14 042
0,4	11 392	50 974	1,8	3,2	9077	90 56
0,45	7703	33 817	1,8	2,6	6170	6170
0,5	5428	23 427	2	2,6	4368	4368
0,55	3955	16 807	2	2,2	3196	3196
0,6	2962	12 414	2	2	2402	2392
0,7	1775	7254	2	2	1449	1427

деформаций подобраны значения коэффициентов m . Коэффициенты, расчетные и экспериментальные значения числа циклов до разрушения при различных амплитудах деформации представлены в табл. 1. Подобранные расчетные значения показателей степени m хорошо согласуются с экспериментальными данными, что показывает возможность применения нелинейной модели Марко – Старки для прогнозирования циклической долговечности при сложной М-образной форме цикла.

Однако встает вопрос о единственности решения, связанный с возможностью нахождения множества других комбинаций показателей степени (например, с аналогичной точностью предсказания ресурса при М-образной форме цикла можно предложить комбинации показателей степени со взаимной перестановкой значений m_1 и m_2). Для получения единственности решения требуется проведение дополнительных экспериментов при других формах цикла или параметрах нагружения, для которых выбранные значения показателей степени будут давать удовлетворительный прогноз.

2. Прогнозирование долговечности при блочном циклическом нагружении

Для проведения расширенной программы исследований и оценки возможности нахождения единственного набора значений показателей степени в нелинейной модели Марко – Старки использовался конструкционный сплав Д16Т. Данный алюминиевый сплав широко применяется для изготовления деталей авиационной промышленности. Благодаря высокой прочности по отношению к массе сплав используется в компонентах, подвергающихся высоким нагрузкам. Методика планирования экспериментальных исследований разрабатывалась в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 25.505-85 и ASTM E606-42. Для проведения экспериментов использовалась сервогидравлическая испытательная система Instron 8801 и осевой экстензометр Instron с базой 12,5 мм. Расширенная программа экспериментальных исследований малоцикловой усталости сплава Д16Т

включала комплексы испытаний цилиндрических образцов при простых формах цикла с постоянными параметрами и разных блоков, представляющих собой циклы сложной формы, состоящие из комбинаций циклов простой формы с разными параметрами.

Для проведения комплекса испытаний на малоцикловую усталость с постоянными параметрами цикла были выбраны несколько уровней нагружения с разными амплитудами и коэффициентами асимметрии. Нагружение проводилось с формой цикла в виде треугольника. Заданные параметры циклов простой формы, количество испытанных образцов и полученные средние значения долговечности приведены в табл. 2.

Таблица 2/Table 2

Результаты испытаний алюминиевого сплава Д16Т на малоцикловую усталость с постоянными параметрами цикла

Tests results of aluminum alloy D16T for low-cycle fatigue with constant cycle parameters

Количество образцов	Амплитуда деформаций в цикле, ε_a , %	Размах деформации в цикле, ε_p , %	Коэффициент асимметрии R	Среднее число циклов в группе, N
3	0,70	1,40	0,00	522
3	0,60	1,20		3360
5	0,38	0,76		37 973
5	0,38	0,76	0,46	19 016

По полученным экспериментальным данным на малоцикловую усталость с постоянными параметрами цикла построена кривая малоцикловой усталости в логарифмических координатах, представленная на рис. 3.

Для прогнозирования циклической долговечности алюминиевого сплава в условиях блочного нагружения, использована кривая малоцикловой усталости, по которой заново определены значения циклической долговечности для нескольких уровней деформации. Полученные значения долговечностей при разных уровнях деформаций представлены в табл. 3. Сложные формы

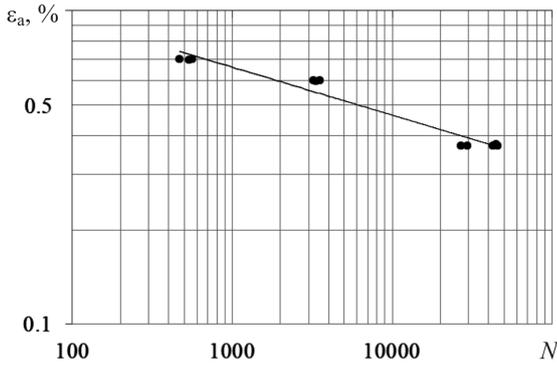


Рис. 3. Кривая малоциклового усталости сплава Д16Т при коэффициенте асимметрии $R = 0$

Fig. 3. Low-cycle fatigue curve of alloy D16T at asymmetry coefficient $R = 0$

Таблица 3/Table 3

Долговечность алюминиевого сплава Д16Т при разных уровнях деформаций, определенная по кривой усталости

Durability of aluminum alloy D16T at different levels of deformation determined from the fatigue curve

Номер группы	Амплитуда деформации в цикле, ϵ_a , %	Коэффициент асимметрии R	Количество циклов N
1-я	0,70	0,00	688
2-я	0,38	0,00	40660
3-я	0,40	0,00	26667
4-я	0,50	0,00	6203

циклов в виде блоков состоят из различных комбинаций групп циклов простой формы с разной амплитудой деформации и коэффициентами асимметрии. Параметры групп подциклов, из которых составлялись блоки, соответствуют параметрам циклов, приведенным в табл. 3 с коэффициентом асимметрии 0 (1–4-я группы) и в табл. 2 с коэффициентом асимметрии 0,46 (5-я группа). Используемые схемы циклического блочного нагружения, состоящие из разных комбинаций подциклов, представлены на рис. 4.

Получена эмпирическая формула линии регрессии, которая описывается степенной функцией:

$$\epsilon_a = 1,902 \cdot N^{-0,153} \quad (3)$$

Состав блоков по числу циклов включенных групп и результаты испытаний на малоцикловую усталость при блочном циклическом деформировании представлены в табл. 4. До разрушения считалось общее количество блоков.

Представленные результаты экспериментальных исследований алюминиевого сплава Д16Т использовались для оценки возможности использования нелинейной модели накопления повреждений Марко – Старки для случая блочного нагружения.

Предлагается методика определения показателей степени модели Марко – Старки. Поиск коэффициентов

степени m осуществлялся в диапазоне показателей степеней от 0,2 до 10 с шагом 0,2. Сопоставление результатов прогнозирования по блокам 2, 3 и 4, состоящих из трёх групп, позволило найти четыре комбинации идентичных показателей степеней m по группам 1 и 5 (так как они присутствуют во всех блоках). Значения комбинаций степеней и расчетные значения долговечностей приведены в табл. 5. Результат прогнозирования по модели Марко – Старки с использованием данных коэффициентов соответствует экспериментальным данным.

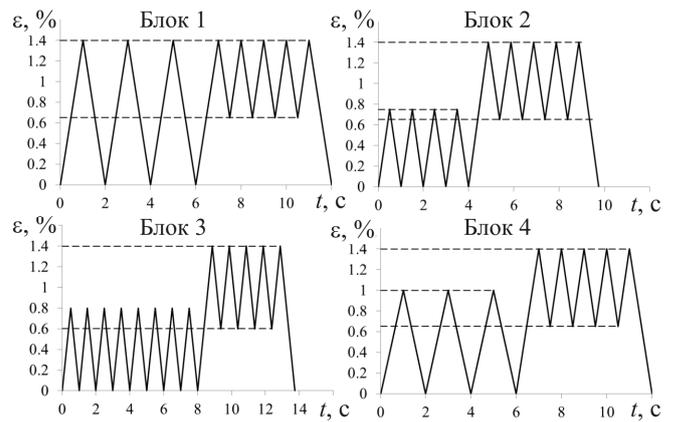


Рис. 4. Схемы изменения осевой деформации при блочном циклическом деформировании

Fig. 4. Schemes of change in axial deformation during block cyclic deformation

Таблица 4/Table 4

Состав блоков из циклов с постоянными параметрами и результаты испытаний на малоцикловую усталость при блочном нагружении

Blocks composition of cycles with constant parameters and the results of tests for low-cycle fatigue under block loading

Состав блока	Количество испытанных образцов	Число блоков до разрушения, N
1 блок: 4 цикла из 1-й группы, 4 цикла из 5-й группы	5	131
		135
		95
		261
		281
Среднее число циклов $N_{1Б}$		181
2 блок: 4 цикла из 2-й группы, 1 цикл из 1-й группы, 4 цикла из 5-й группы	6	610
		556
		723
		462
		508
Среднее число циклов $N_{2Б}$		546
3 блок: 8 циклов из 3-й группы, 1 цикл из 1-й группы, 4 цикла из 5-й группы	3	379
		388
		368
Среднее число циклов $N_{3Б}$		378
4 блок: 3 цикла из 4-й группы, 1 цикл из 1-й группы, 4 цикла из 5-й группы	3	437
		372
		407
Среднее число циклов $N_{4Б}$		405

Таблица 5/Table 5

Найденные комбинации показателей степеней для разных блоков
Found combinations of exponents included for different blocks

№ блока	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	Экспериментальное число циклов $N_{\text{экспер.}}$	Прогнозируемое число циклов $N_{\text{прогноз.}}$
2	0,4	1,0	–	–	0,6	546	546
	0,8	2,0	–	–	1,2		
	1,2	3,0	–	–	1,8		
	3,2	6,6	–	–	5,6		
3	0,4	–	2,8	–	0,6	376	376
	0,8	–	5,6	–	1,2		
	1,2	–	8,4	–	1,8		
	3,2	–	1,0	–	5,6		
4	0,4	–	–	1,2	0,6	405	406
	0,8	–	–	2,4	1,2		
	1,2	–	–	3,6	1,8		
	3,2	–	–	9,4	5,6		

Таблица 6/Table 6

Показатели степеней для блока 1
Exponents for block 1

m_1	m_5	Суммарная значение параметра поврежденности для одного блока $\Sigma D_{\text{Б1}}$
0,4	0,6	1,03
0,8	1,2	1,07
1,2	1,8	1,11
3,2	5,6	1,33

Библиографический список

- Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // Int J Fatigue. – 2003. – Vol. 25, no. 8. – P. 679–702. DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00051-3.
- Bhaumik S., Sujata M., Venkataswamy M. Fatigue failure of aircraft components // Engineering Failure Analysis. – 2008. – Vol. 15, no 6. – P. 675–694. doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.10.001.
- Скибин В.А., В.И. Солонина. Научный вклад ЦИАМ в создание авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. 1. – 725 с.
- Нихамкин М.Ш., Вятчанин Д.А. Вероятностная оценка циклической долговечности дисков ГТД из гранулируемых материалов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 1. – С. 70–71.
- Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 219 с.
- Багмутов В.П., Столярчук А.С., Коробов А.В. Исследование повреждаемости конструкционных материалов при малоциклового усталости после предварительного упрочнения поверхности // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – Т. 9, № 6. – С. 105–109.
- Беляев М.С., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М. Изменение параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ при жестком нагружении жаропрочного сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ. – 2015. – № 12. – С. 30–35.

Для поиска наиболее подходящих комбинаций использовался блок 1, состоящий только из групп 1 и 5. Окончательный выбор пары коэффициентов осуществлялся из условия близости прогнозируемого параметра поврежденности к единице, представленной в табл. 6.

Наиболее точный прогноз, который предсказывает суммарную поврежденность в блоке, близкую к единице, дают значения коэффициентов $m_1 = 0,4$ и $m_5 = 0,6$. Для других групп (коэффициенты m_2, m_3, m_4) осуществить однозначный выбор показателей степени не получается, так как требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований при блочном нагружении, состоящих из подциклов оставшихся групп.

Заключение

Показана принципиальная возможность использования нелинейной модели накопления повреждений Марко – Старки для случая блочного циклического нагружения. Предложена новая методика определения показателей степени m . Показана возможность нахождения единственной комбинации показателей степеней, исходя из условия близости к единице значения параметра поврежденности для проверочного блока. Недостатком предложенного подхода прогнозируемой циклической долговечности является отсутствие экспериментальных данных, свидетельствующих об изменении поврежденности конструкционных сплавов при циклическом нагружении в интервале от 0 до 1, которые бы подтвердили (или опровергли) найденные значения показателей степени в модели Марко – Старки.

- Экспериментальная проверка модели суммирования повреждений при циклическом нагружении дисков турбин / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, А.В. Ильиных, А.М. Ратчиев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4–5. – С. 1372–1375.

- Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates / M. Wang, J.C. Pang, H.Q. Liu, C.L. Zou, S.X. Li, Z.F. Zhang // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 127. – P. 268–274. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.023

- Ильиных А.В., Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование механического поведения конструкционных сплавов при двухосном циклическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 115–123.

- Механическое поведение конструкционной стали ЭП517Ш при двухосной малоциклового усталости в условиях нормальных и повышенных температур / Е.В. Ломакин, М.П. Третьяков, А.В. Ильиных, А.В. Лыкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 77–86.

- Low cycle fatigue and Creep-Fatigue behavior on Ni-based alloy 230 at 850°C / X. Chen, Z. Yang, M.A. Sokolov [et al.] // Mater. Sei. and Eng. A. – 2013. – Vol. 563. – P. 152–162. DOI: 10.1016/j.msea.2012.11.063

13. Jianjun He, Jian Chen, Qingmin Sun Effect of Loading Rate on Low-cycle Fatigue Properties of Turbine Rotor Steel // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 3. – P. 1773–1779. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.286.
14. Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R. Effect of the strain rate on the low cycle fatigue behavior of a 10Cr-2W-Mo-3Co-NbV steel at 650 °C // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 100. – Part 1. – P. 113–125. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.025.
15. S.M. Humayun Kabir, Tae-in Yeo Influence of temperature on a low-cycle fatigue behavior of a ferritic stainless steel // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2014. – Vol. 28, no 7. – P. 2595–2607.
16. Han Q., Wang P., Lu Y. Low-cycle multiaxial fatigue behavior and life prediction of Q235B steel welded material // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 127. – P. 417–430. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.027.
17. Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy / S. Hasegawa, Y. Tsuchida, H. Yano, M. Matsui // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29. – P. 1839–1845. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.006.
18. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – С. 279.
19. Brown M.W., Miller K.J. A theory for fatigue under multiaxial stress-strain conditions // *Proc Inst Mech Eng*. – 1973. – Vol. 187. – P. 745–756.
20. Fatemi, D.F. Socie A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 1988. – Vol. 11. – P. 149–165.
21. Glinka G., Shen G., Plumtree A. Mean stress effect in multiaxial fatigue // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 1995. – Vol. 18. – P. 755–764.
22. Wang C.H., Brown M.W. A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. – 1993. – Vol. 16. – P. 1285–1298.
23. Manson S.S. Discussion of Tavernelli and Coffin // *J Basic Eng, Trans ASME*. – 1962. – Vol. 84. – P. 537–541.
24. Manson S.S. Fatigue: a complex subject – Some simple approximations // *Experimental Mechanics*. – 1965. – № 5. – P. 193–226.
25. Куранаков С.Я., Раимбердиев Т.П., Яковченко С.Г. О применимости кинетического уравнения повреждений энергетического типа для расчета момента разрушения металлических материалов // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2007. – № 6. – С. 71–75.
26. Трощенко В.Т. Критерии усталостной прочности металлов и сплавов, основанные на учете рассеяния энергии // *Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем*. – Киев: Наук. думка, 1966. – С. 168–177.
27. Smith N., Watson P., Topper T.H. A stress-strain function or the fatigue of materials // *J. Mate*. – 1970. – Vol. 5.
28. Ince A., Glinka G. A modification of Morrow and Smith-Watson-Topper mean stress correction models // *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*. – 2011. – Vol. 34, no 11. – P. 854–867. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2011.01577.x
29. Feltner J.D., Morrow C.E. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. *Trans. ASMED*, 1961. – Vol. 83, no 1. – P. 15–22.
30. Martin D.E. An energy criterion for low-cycle fatigue // *J. Basic Eng., Trans. ASME*. – 1961. – P. 565–571.
31. Benedetti M., Berto F., Santus C. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components // *International Journal of Fatigue*. – 2020. – Vol. 133. – 105397. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105397.
32. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature / W. Du, Y. Luo, Y. Wang, S. Chen, D. Yu // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2017. – Vol. 40. – P. 994–1004.
33. A strain energy density based life prediction model for notched components in low cycle fatigue regime / P. Zhao, T-Y Lu, J-G Gong, F-Z Xuan, F. Berto // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2021. – Vol. 193. – 104458. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104458.
34. Marco S.M., Starkey W.L. A concept of fatigue damage // *Trans ASME*. – 1954. – Vol. 76. – P. 627–632.
35. Gatts R.R. Cumulative fatigue damage with random loading *ASME Journal of Basic Engineering*. – 1962. – Vol. 84. – P. 403–409.
36. Corten H.T., Dolon T.J. Cumulative fatigue damage // *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals Institution of Mechanical Engineering and American Society of Mechanical Engineers*. – 1956. – P. 235–246.
37. A non-linear continuous fatigue damage model / J.L. Chaboche [et al.] // *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. – 1988. – Vol. 11. – P. 1–17.
38. Huffman P.J., Beckman S.P. A non-linear damage accumulation fatigue model for predicting strain life at variable amplitude loadings based on constant amplitude fatigue data // *International Journal of Fatigue*. – 2013. – Vol. 48. – P. 165–169. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.10.016.
39. Shang D., Yao W.A nonlinear damage cumulative model for uniaxial fatigue // *Int J Fatigue*. – 1999. – Vol. 21. – P. 187–194.
40. Ma S., Yuan H. A continuum damage model for multiaxial low cycle fatigue of porous sintered metals based on the critical plane concept // *Mech Mater*. – 2017. – Vol. 104. – P. 13–25. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.09.013.
41. Моделирование процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях при блочном малоцикловом нагружении / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, Д.Н. Шишулин // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 15–22. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.1.2.
42. Багмутов В.П., Савкин А.Н., Седов А.А. Прогнозирование долговечности конструкционных сталей на основе моделирования поврежденности при переменном нагружении // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2010. – Т. 6, № 66. – С. 5–8.
43. Прогнозирование долговечности конструкционных сталей при циклическом нагружении / А.Н. Савкин, А.А. Седов, А.В. Сиромахин, А.В. Андроник // *Изв. ВолгГТУ. Серия: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград. – 2011. – № 5. – С. 99–105.
44. Вильдеман В.Э. Моделирование процессов деформирования и разрушения композитов. Ч. 1: Модели накопления повреждений: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. – 76 с.

References

- Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *Int J Fatigue*, 2003, vol. 25 – No. 8, pp. 679–702. doi: 10.1016/S0142-1123(03)00051-3.
- Bhaumik S., Sujata M., Venkataswamy M. Fatigue failure of aircraft components. *Engineering Failure Analysis*, 2008, Vol 15, No 6, pp. 675–694. doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.10.001.
- Skibin V.A., V.I. Solonina. Nauchnyi vklad TsIAM v soz-danie aviatsionnykh dvigatelei vol. 1, *Moscow: Mashinostroenie*, 2000, p. 725.
- Nikhamkin M.Sh., Viatchanin D.A. Veroiatnostnaia ot-senka tsiklicheskoj dolgovechnosti diskov GTD iz granuliruemykh materialov. *Izvestiia Vuzov. Aviatsionnaia tekhnika*, 2008, no. 1, p. 70–71.
- Kuznecov N.D., Tseitlin V.I. Ekvivalentnye ispytaniia ga-zoturbinykh dvigatelei. *Moscow Mashinostroenie*, 1976, p. 219.
- Bagmutov V.P., Stoljarchuk A.S., Korobov A.V. Issledo-vanie povrezhdaemosti konstruksionnykh materialov pri malotsik-lovoi ustalosti posle predvaritel'nogo uprochneniia poverkhnosti. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo uni-versiteta*, 2012, T. 9, no. 6, p. 105–109.
- Beljaev M.S., M.A. Gorbovec, M.M. Bakradze Change of parameters of elasto-plastic deformation for lcf testing ni-base superalloy vzh175. *Trudy VIAM*, 2015. no. 12, p. 30–35.
- Inozentzev A.A., Nikhamkin M. Sh., Ilynich A.V., Ratchiev A.M., A.M. Experimental checking the summation dam-ages model at cyclic loading of turbines disks. *Izvestija Samar-skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (5), P. 1372–1375.
- Wang M., Pang J.C., Liu H.Q., Zou C.L., Li S.X., Zhang Z.F. Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates. *International Journal of Fatigue*, 2019. – vol. 127, pp. 268–274. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.023.
- Ilnykh A.V., Wildeman V.E., Tretyakov M.P. Experi-mental research of the mechanical behavior of structural alloys under biaxial cyclic loading. *PNRPU Aerospace Engineering Bul-letin*, 2017, vol. 51, pp. 115–123.
- Lomakin E.V., Tretjakov M.P., Ilnykh A.V., Lykova A.V. Mechanical behavior of X15CRNI12-2 structural steel under biaxial low-cycle fatigue at normal and elevated temperatures. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, p. 77–86.
- Chen X., Yang Z., Sokolov M.A. et al. Low cycle fatigue and Creep-Fatigue behavior on Ni-based alloy 230 at 850°C. *Ma-ter. Sei. and Eng. A*, 2013, vol. 563, pp. 152–162. doi: 10.1016/j.msea.2012.11.063
- Jianjun He, Jian Chen, Qingmin Sun Effect of Loading Rate on Low-cycle Fatigue Properties of Turbine Rotor Steel. *Pro-cedia Materials Science*, 2014, vol. 3, pp. 1773–1779. doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.286.
- Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R. Effect of the strain rate on the low cycle fatigue behavior of a 10Cr-2W-Mo-3Co-NbV steel at 650 °C. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 100, Part 1, pp 113–125. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.025.
- S.M. Humayun Kabir, Tae-in Yeo Influence of tempera-ture on a low-cycle fatigue behavior of a ferritic stainless steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, vol. 28, No7, pp. 2595~2607.
- Han Q., Wang P., Lu Y. Low-cycle multiaxial fatigue behavior and life prediction of Q235B steel welded material. *In-ternational Journal of Fatigue*, 2019, vol. 127, pp. 417–430. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.027.
- Hasegawa S., Tsuchida Y., Yano H., Matsui M. Evalua-tion of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy. *Internat-ional Journal of Fatigue*, 2007, vol. 29, pp. 1839–1845. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.006.
- Romanov A.N. Razrushenie pri malociklovom nagruz-henii. *Moscow, Nauka*, 1988, p. 279.
- Brown M.W., Miller K.J. A theory for fatigue under mul-tiaxial stress–strain conditions. *Proc Inst Mech Eng*, 1973. Vol. 187, pp. 745–756.
- Fatemi, D.F. Socie A critical plane approach to multiax-ial fatigue damage including out-of-phase loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1988, vol. 11, pp. 149–165.
- Glinka G., Shen G., Plumtree A. Mean stress effect in multiaxial fatigue. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1995, vol. 18, pp. 755–764.
- Wang C.H., Brown M.W. A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading. *Fa-tigue Fract Eng Mater Struct*, 16 (1993), pp. 1285–1298
- Manson S.S. Discussion of Tavernelli and Coffin. *J Ba-sic Eng, Trans ASME*, 1962, vol. 84, pp. 537–541.
- Manson S.S. Fatigue: a complex subject – Some simple ap-proximations. *Experimental Mechanics*, 1965, No. 5, pp. 193–226.
- Kuranakov S.Ja. O primenimosti kineticheskogo urav-neniya povrezhdenij jenergeticheskogo tipa dlja rascheta momenta razrusheniya metallicheskih materialov. *Izvestija vuzov. Mashinos-troenie*, 2007, no. 6, pp. 71–75.
- Troshhenko V.T. Kriterii ustalostnoj prochnosti metallov i splavov, osnovannye na uchete rassejaniya jenerгии. Rassejanie jenerгии pri kolebanijah uprugih sistem, *Kiev, Nauk. dumka*, 1966, pp. 168–177.K.
- Smith N., Watson P., Topper T.H. A stress-strain func-tion or the fatigue of materials. *J. Mate*, 1970, vol. 5.
- Ince A., Glinka G. A modification of Morrow and Smith-Watson-Topper mean stress correction models. *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*, 2011, vol. 34, No. 11, pp. 854–867. doi: 10.1111/j.1460-2695.2011.01577.x
- Feltner J.D., Morrow. C.E. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. *Trans. ASMED*, 1961, vol. 83, No – 1, pp. 15–22.
- Martin D.E. An energy criterion for low-cycle fatigue. *J. Basic Eng., Trans. ASME*, 1961, pp. 565–571.
- Benedetti M., Berto F., Santus C. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 133, 105397. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105397.
- Du W., Luo Y., Wang Y., Chen S., Yu D. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature. *Fatigue & Fracture of Engineering Mate-rials & Structures*, 2017, vol. 40, P. 994–1004.
- Zhao P., Lu T-Y, Gong J-G, Xuan F-Z, Berto F. A strain energy density based life prediction model for notched compo-nents in low cycle fatigue regime. *International Journal of Pres-sure Vessels and Piping*, 2021, vol. 193, 104458. doi: 10.1016/j.ijpvp.2021.104458.
- Marco S.M., Starkey W.L. A concept of fatigue damage. *Trans ASME*, 1954, vol. 76, pp. 627–632.
- Gatts R.R. Cumulative fatigue damage with random loading *ASME Journal of Basic Engineering*, 1962, vol. 84, pp. 403–409.

36. Corten H.T., Dolon T.J. Cumulative fatigue damage. *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals Institution of Mechanical Engineering and American Society of Mechanical Engineers*, 1956, pp. 235–246.
37. Chaboche J.L., et al. A non-linear continuous fatigue damage model. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1988, vol. 11, pp. 1–17.
38. Huffman P.J., Beckman S.P. A non-linear damage accumulation fatigue model for predicting strain life at variable amplitude loadings based on constant amplitude fatigue data. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 48, pp. 165–169. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.10.016.
39. Shang D., Yao W. A nonlinear damage cumulative model for uniaxial fatigue. *Int J Fatigue*, 1999, vol. 21, pp. 187–194.
40. Ma S., Yuan H. A continuum damage model for multi-axial low cycle fatigue of porous sintered metals based on the critical plane concept. *Mech Mater*, 2017, vol. 104, pp. 13–25. doi: 10.1016/j.mechmat.2016.09.013.
41. Volkov I.A., Korotkih Ju.G., Panov V.A., Shishulin D.N. Modeling of fatigue damage accumulation in structural steels under low-cycle block loading. *Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred*, 2014, T. 7, no. 1, pp. 15–22. doi: 10.7242/1999-6691/2014.7.1.2.
42. Bagmutov V.P., Savkin A.N., Sedov A.A. Prognostication of durability of constructional steels based on damage modeling under alternating loading. *Izvestija volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2010, T. 6, no. 66, pp. 5–8.
43. Savkin A.N. Prognozirovanie dolgovechnosti konstrukcionnyh stalej pri ciklicheskom nagruženii / Savkin A.N., Sedov A.A., Siromahin A.B., Andronik A.B. // *Izv. VolgGTU. Serija "Problemy materialovedenija, svarki i prochnosti v mashinostroenii"*. Vyp. 5: mezhvuz. sb. nauch. st, Volgograd, 2011, no. 5, pp. 99–105.
- Vildeman V.E. M Modelirovanie protsessov deformirovanija i razrušenija kompozitov. Ch. 1: Modeli nakoplenija povrezhdenii: Učebiu posobie / Perm. gos. tekhn. un-t. Perm', 2000, p. 76.

Финансирование. Работа выполнена в Центре экспериментальной механики ПНИПУ при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-38-90270) и в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The work was carried out at the Center of Experimental Mechanics of PNRPU with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-38-90270) and within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. FSNM-2020-0027).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.