



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.1.04

УДК 539.43

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МНОГООСНОЙ УСТАЛОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДВУХОСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А.А. Габэ¹, В.Э. Вильдеман², А.С. Янкин³

¹НТЦ «Турбопневматик», Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 11 ноября 2021 г.

Одобрена: 29 марта 2022 г.

Принята к публикации:

01 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

усталость, многоосное нагружение, смешанные моды нагружения, сложное напряженное состояние, долговечность, модели многоосной усталости, алюминиевый сплав, растяжение, кручение, сдвиг фаз.

АННОТАЦИЯ

В процессе эксплуатации детали современных машин и их узлы подвергаются сложным циклическим нагрузкам. При этом в изделиях может возникать сложное напряженно-деформированное состояние, что может приводить к существенному снижению их усталостной долговечности. В связи с этим актуальным становится развитие методов предсказания усталостного разрушения ответственных конструкций. Осуществлена проверка простого подхода для описания представленных в литературе экспериментальных данных по многоосной усталости и его сравнение с известными моделями многоосной усталости. В рамках исследования рассматривались актуальные экспериментальные работы, содержащие опытные данные по многоосной усталости алюминиевых сплавов 2024-T3 и 2024-T4, которые активно используются в конструкциях самолётов, судов и космических аппаратов. В результате были рассмотрены модель Сайнс и её модернизированная версия (с учётом первого инварианта тензора напряжений по амплитудным значениям). При этом был разработан подход по определению констант моделей по результатам двух вариантов установочных опытов. В работе представлены результаты в виде зависимостей расчётного и экспериментального числа циклов до разрушения, полученных с использованием моделей Сайнс и её модификации по двум видам установочных испытаний. В заключительной части работы проведён сравнительный анализ моделей Сайнс и её модификации, Смит – Ватсон – Топпер, Фатемиде – Сосии и её модификации. Анализ показал, что модернизация модели Сайнс существенно улучшает её предсказательную способность, предложенная модель лучше описывает экспериментальные данные, чем традиционная модель Сайнс и подход Смит-Ватсон-Топпер. При этом описательная способность модели сопоставима с моделью Фатемиде – Сосии.

© ПНИПУ

© Габэ Алена Андреевна – инж., e-mail: gabe.alena@mail.ru.

Вильдеман Валерий Эрвинович – д.ф.-м.н., проф., e-mail: wildemann@pstu.ru.

Янкин Андрей Сергеевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: yas.cem@yandex.ru.

Alena A.Gabe – Engineer, e-mail: gabe.alena@mail.ru.

Valerii E. Wildeman – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: wildemann@pstu.ru.

Andrey S. Yankin – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: yas.cem@yandex.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)

ANALYSIS OF MULTIAXIAL FATIGUE MODELS BASED ON THE RESULTS OF BIAxIAL TESTS FOR ALUMINUM ALLOYS

A.A. Gabe¹, V.E. Wildeman², A.S. Yankin³

¹NTC Turbopnevmatik, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 11 November 2021
Approved: 29 March 2022
Accepted for publication: 01 April 2022

Keywords:

fatigue, multiaxial loading, mixed loading modes, complex stress state, the fatigue life, multiaxial fatigue models, aluminum alloy, tension, torsion, phase shift.

ABSTRACT

During operation, modern structures and their parts are subjected to complex cyclic loads. In this case, a complex stress-strain state can arise in products, which can lead to a significant decrease in their fatigue life. In this regard, the development of methods for predicting fatigue fracture of critical structures becomes urgent. The purpose of this work is to test a simple approach for describing multiaxial fatigue datasets presented in the literature and compare it with known multiaxial fatigue models. Within the framework of the study, actual experimental data was considered, containing experimental data on the multiaxial fatigue of aluminum alloys 2024-T3 and 2024-T4. The alloys are actively used in the designs of aircraft, ships and spacecraft. As a result, the Sines model and its modernized version were considered (taking into account the first invariant of the stress tensor with respect to amplitude values). At the same time, an approach was developed to determine the constants of the models based on the results of two variants of training experiments. The paper presents the results in the form of relationships of the predicted and experimental fatigue life, obtained using the Sines model and its modification for two types of training tests. In the final part of the work, a comparative analysis of the Sines model and its modification, Smith-Watson-Topper, Fatemi-Socie and its modification is carried out. The analysis showed that the modified Sines model significantly improves the predictive ability, the proposed model better described the experimental data than the traditional Sines model and the Smith-Watson-Topper approach. At the same time, the descriptive ability of the model is comparable to the Fatemi-Socie one.

© PNRPU

Введение

В процессе работы многие детали современных машин и их узлы подвергаются сложному циклическому нагружению [1], а экспериментальные исследования на усталость требуют больших материальных и временных затрат. Вид напряженного состояния в конструкции может оказывать существенное влияние на долговечность функционирования, в отдельных случаях существенно снижая срок службы элементов конструкций.

При изготовлении могут возникать пористость, повышенная шероховатость поверхности и т.д. [2]. Также в процессе эксплуатации на деталях могут возникать зазубрины и вмятины [3–4]. Кроме того, в конструкции могут быть отверстия и другие геометрические элементы. Всё вышеперечисленное может быть причиной присущей многоосности: поля напряжений или деформаций вблизи концентрации напряжений или деформаций являются многоосными даже при одноосных нагрузках [5]. Таким образом, важным является анализ долговечности материалов в условиях, приближенных к условиям работы реальных конструкций, а именно – при многоосном циклическом нагружении [6–9].

Усталостное разрушение в большинстве случаев происходит по причине зарождения и распространения трещины, которая после достижения некоторого размера быстро увеличивается и, как следствие, происходит разрушение [10]. Напряжения и деформации, при кото-

рых обычно происходит усталостное разрушение, ниже тех, которые приводят к разрушению в статических условиях [1].

Параметры нагружения (изменение соотношения амплитуд напряжений, сдвига фаз, соотношения частот нагружения, средних напряжений в цикле и т.д.) могут существенно влиять на усталость материала [11–18]. Для описания усталостного поведения используются различные модели многоосной усталости, которые можно разделить на три группы: основанные на напряжении, деформации и энергии [19]. Согласно публикациям [20–26], критерии не способны описывать одновременно различные типы материалов и условия нагружения. Таким образом, существующие методики оценки усталостной прочности основаны на эмпирических зависимостях и применимы только для ограниченного круга задач [27], поэтому существует необходимость в создании наиболее универсального подхода, способного охватывать широкий спектр материалов и условий нагружения. Целью данной работы является проверка простого подхода для описания представленных в литературе экспериментальных данных по многоосной усталости.

1. Исходные данные

В рамках исследования рассматривались актуальные экспериментальные работы [28–31], содержащие экспериментальные данные по многоосной усталости

алюминиевых сплавов 2024-T3 и 2024-T4. Данные из работ [29] и [30] были объединены ввиду использования авторским коллективом одинакового материала и термообработки. Механические свойства алюминиевого сплава 2024 приведены в табл. 1–2. Все испытания осуществлены при комнатной температуре в условиях двухосного нагружения при растяжении / сжатии / кручении [28; 29; 31] с использованием трубчатых образцов и изгибе / кручении [30].

Таблица 1 / Table 1

Механические свойства алюминиевого сплава 2024-T4 [28–30]

Mechanical properties of aluminum alloy 2024-T4 [28–30]

E , ГПа	σ_y , МПа	σ_u , МПа	τ_y , МПа	ν
73	400	545	222	0.33

Таблица 2 / Table 2

Механические свойства алюминиевого сплава 2024-T3 [31]

Mechanical properties of aluminum alloy 2024-T3 [31]

E , ГПа	σ_y , МПа	σ_u , МПа	τ_y , МПа	ν
73,4	330	495	–	0.34

2. Расчёт усталостной долговечности по модели Сайнса

Для описания экспериментальных данных была рассмотрена модель Сайнса [32], представленная ниже:

$$N = A \cdot \sigma_{\text{эKB}(S)}^\alpha,$$

где a , A , C – используемые в модели Сайнса константы, I_{1m} – первый инвариант тензора напряжений по средним значениям, I_{2a} – второй инвариант тензора напряжений по амплитудным значениям, N – число циклов до разрушения, $\sigma_{\text{эKB}(S)} = \sqrt{I_{2a}} + C \cdot I_{1m} = \sqrt{I_{2a}}$, так как рассматриваемые эксперименты проводились при коэффициенте асимметрии цикла $R = -1$.

$$I_{1m} = \sigma_{11m} + \sigma_{22m} + \sigma_{33m} = 0$$

$$\sqrt{I_2} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2)}$$

Константы модели a , A определялись двумя способами (два вида установочных опытов):

1. С использованием кривой усталости при симметричном кручении (жирная линия на рис. 1) и точки на усталостной кривой, полученной при симметричном растяжении – сжатии (точка на пунктирной линии на рис. 1).

Кривая усталости при симметричном кручении может быть представлена в виде степенной функции:

$$N = A_2 \cdot \tau_a^{\alpha_2},$$

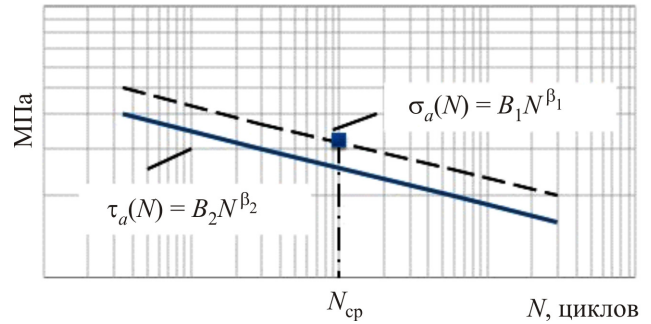


Рис. 1. Кривые усталости при первом виде установочных опытов

Fig. 1. Fatigue curves for the first type of training experiments

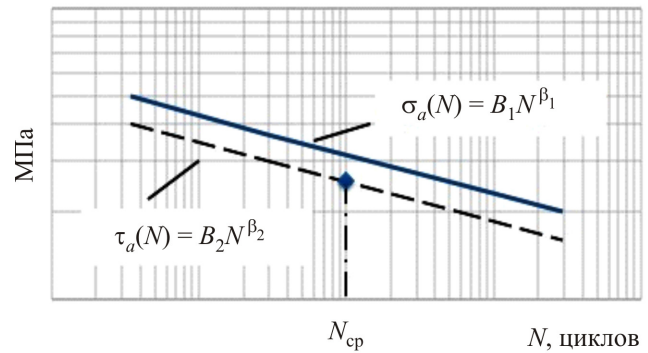


Рис. 2. Кривые усталости при втором виде установочных опытов

Fig. 2. Fatigue curves for the second type of training experiments

где τ_a – амплитуда касательного напряжения. Отсюда константы модели Сайнса равны:

$$A = A_2 = \left(\frac{1}{B_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}},$$

$$\alpha = \alpha_2 = \frac{1}{\beta_2},$$

$$C = \frac{\tau_a(N_{cp})}{\sigma_a(N_{cp})} - \frac{1}{\sqrt{3}},$$

$$N_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n},$$

где B , β – материальные константы, N_{cp} – среднее значение экспериментальной долговечности.

Материальные константы согласно источнику [28] равны:

$B_2 = 602$ МПа, $\beta_2 = -0,111$;
согласно источникам [29–30]:
 $B_2 = 764$ МПа, $\beta_2 = -0,145$;
согласно источнику [31]:
 $B_2 = 439$ МПа, $\beta_2 = -0,078$.

2. Во втором подходе для определения констант a , A использовались усталостная кривая при симметричном растяжении – сжатии (жирная линия на рис. 2) и одной

точке на усталостной кривой, полученной при симметричном кручении (точка на пунктирной линии на рис. 2).

Уравнение кривой усталости при симметричном растяжении – сжатии может быть переписано следующим образом:

$$N = A_1 \cdot \sigma_a^{\alpha_1},$$

где σ_a – амплитуда нормального напряжения. Отсюда константы модели Сайнса равны:

$$A = \frac{\left(\frac{1}{B_1}\right)^{\frac{1}{\beta_1}}}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} + C\right)^{\frac{1}{\beta_1}}},$$

$$\alpha = \frac{1}{\beta_1}.$$

Материальные константы согласно источнику [28] равны:

- $B_2 = 1207$ МПа, $\beta_2 = -0,135$;
- согласно источникам [29–30]:
- $B_2 = 1320$ МПа, $\beta_2 = -0,152$;
- согласно источнику [31]:
- $B_2 = 1194$ МПа, $\beta_2 = -0,133$.

Ниже приведены результаты расчета усталостной долговечности по модели Сайнса, представленные на рис. 3, 4. Результаты расчета представлены в виде трех графиков зависимости расчетной долговечности (ось ординат) от экспериментальной (ось абсцисс), соответствующих рассмотренным статьям. Цветными точками обозначены различные виды нагружений, такие как:

симметричное растяжение – сжатие, симметричное кручение, пропорциональное нагружение и непропорциональные виды нагружения со сдвигом по фазе на 30° , 45° , 60° и 90° . На данных графиках черными горизонтальными и вертикальными линиями обозначены области малоциклового и многоциклового усталости. Также на графиках приведены ± 2 и ± 3 факторные ошибки.

Как можно видеть из графиков, большая часть точек выходит за пределы интервалов как при использовании первого, так и при использовании второго варианта установочных опытов.

3. Расчёт усталостной долговечности по предложенной модели

Рассмотренная модель Сайнса учитывает первый инвариант тензора напряжений по средним значениям, который в нашем случае равен нулю для всех рассматриваемых нагружений. В связи с этим было предложено заменить первый инвариант тензора напряжений по средним значениям на первый инвариант тензора напряжений по амплитудным значениям:

$$N = A \sigma_{\text{экв}}^a,$$

где $\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{I_{2a}} + KI_{1a}$, a , A , K – используемые в предложенной модели константы, I_{1a} – первый инвариант тензора напряжений по амплитудным значениям.

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}.$$

Константы предложенной модели определялись аналогично по двум вариантам установочных опытов. На рис. 5, 6 приведены результаты расчёта по предложенной модели.

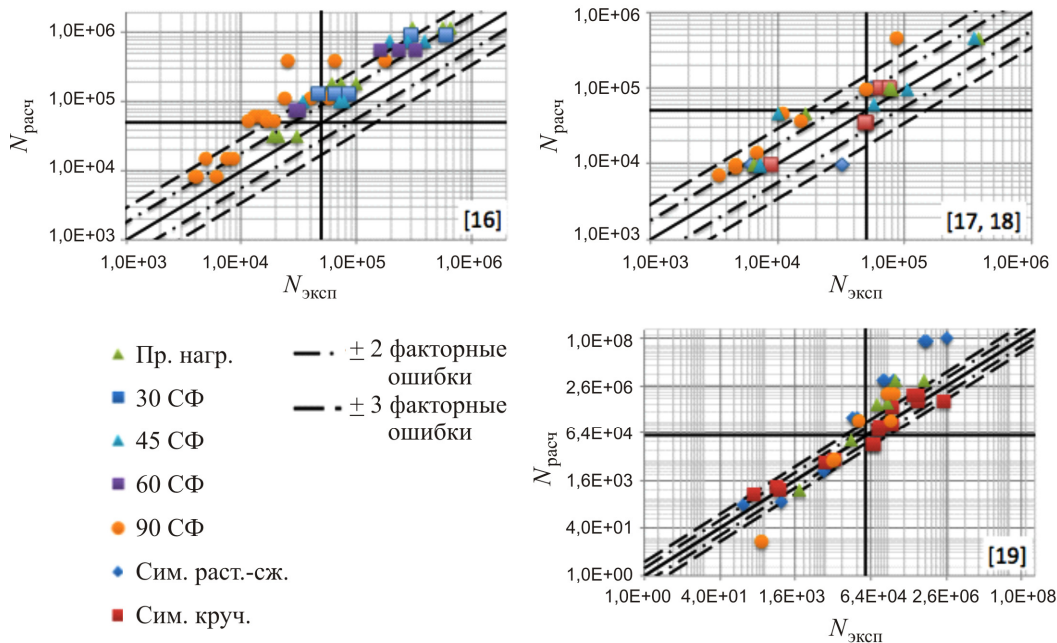


Рис. 3. Зависимость экспериментальной и прогнозируемой усталостной долговечности по модели Сайнса для первого варианта установочных опытов

Fig. 3. Relationship of the experimental and predicted fatigue life according to the Sines model for the first type of training experiments

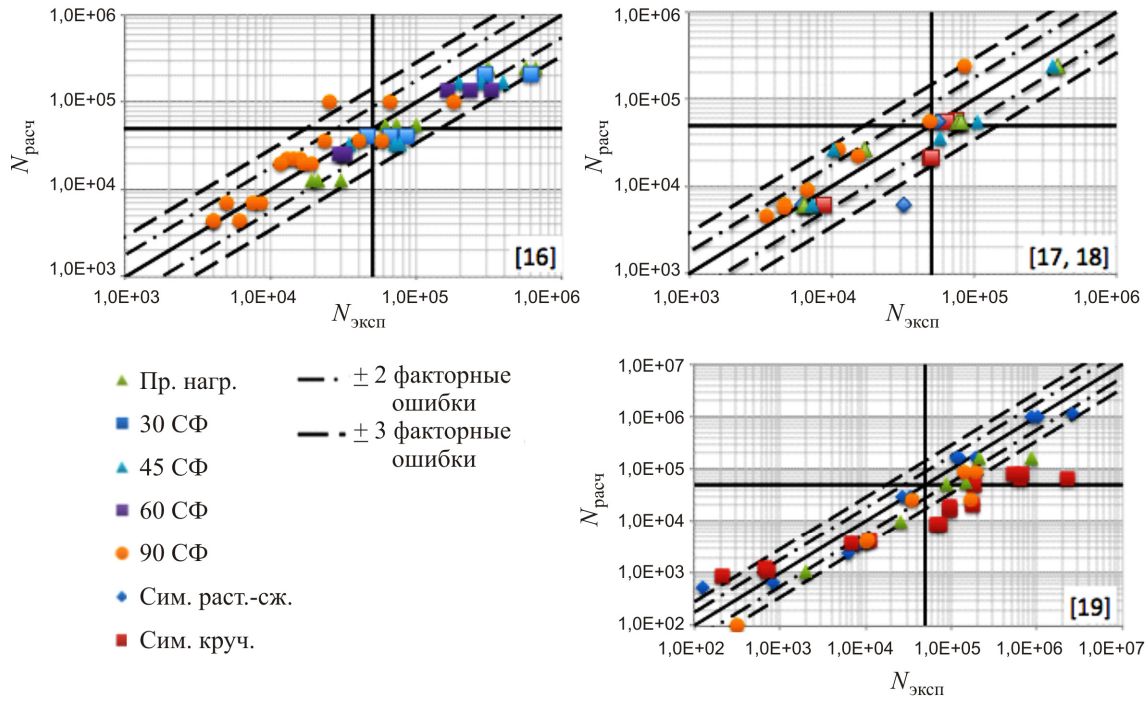


Рис. 4. Зависимость экспериментальной и прогнозируемой усталостной долговечности по модели Сайнса для второго варианта установочных опытов

Fig. 4. Relationship of the experimental and predicted fatigue life according to the Sines model for the second type of training experiments

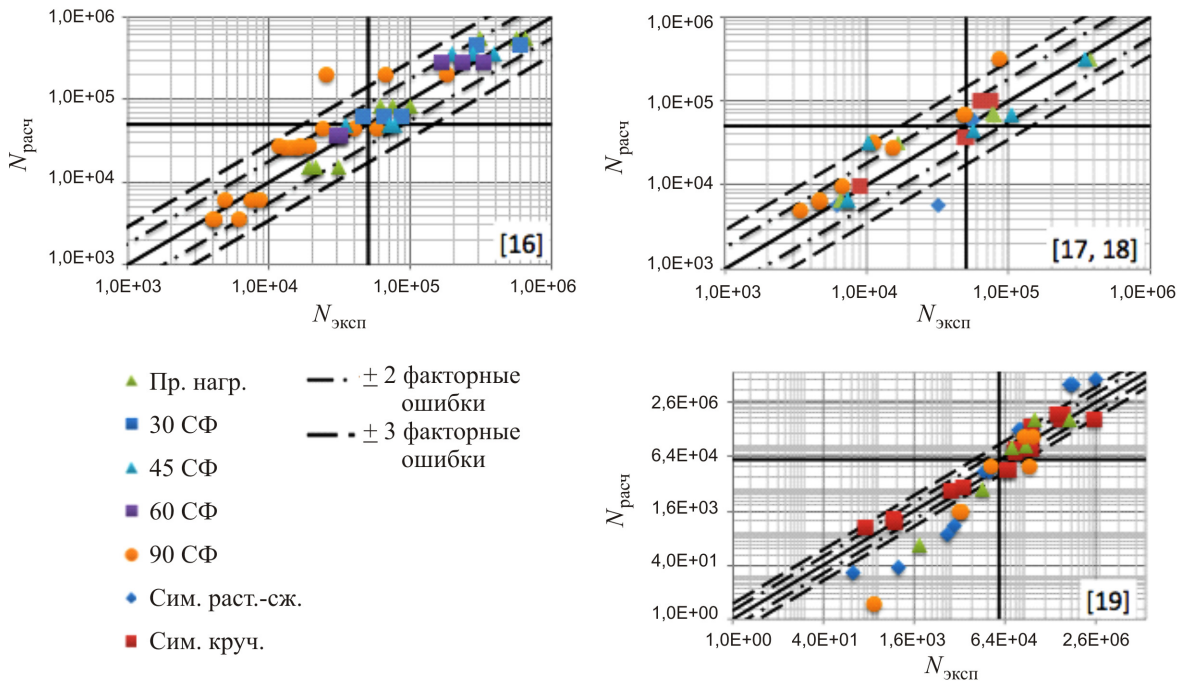


Рис. 5. Зависимость экспериментальной и прогнозируемой усталостной долговечности по модернизированной модели Сайнса для первого варианта установочных опытов

Fig. 5. Relationship of the experimental and predicted fatigue life according to the modified Sines model for the first type of training experiments

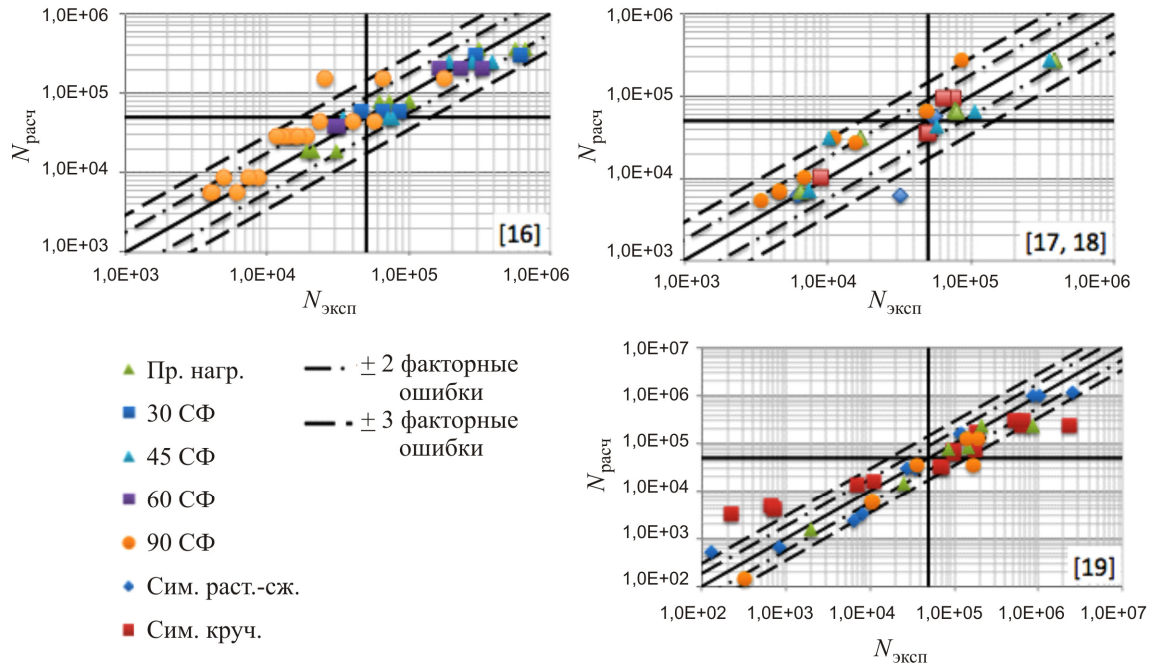


Рис. 6. Зависимость экспериментальной и прогнозируемой усталостной долговечности по модернизированной модели Сайнса для второго варианта установочных опытов

Fig. 6. Relationship of the experimental and predicted fatigue life according to the modified Sines model for the second type of training experiments

4/ Сравнение моделей

В рамках работы проведено сравнение предложенной модели с моделями Смита – Ватсона – Топпера, Фатемиде – Соси и с её модификацией. На рис. 7–9 представлены результаты из статьи [31] по проверяемым моделям. На рис. 7 изображен график зависимости параметра Фатемиде – Соси в зависимости от количества циклов до разрушения [31]. На рис. 8 изображен график зависимости параметра Фатемиде – Соси (модификация) в зависимости от количества циклов до разрушения [31]. На рис. 9 – параметр Смита – Ватсона – Топпера [31].

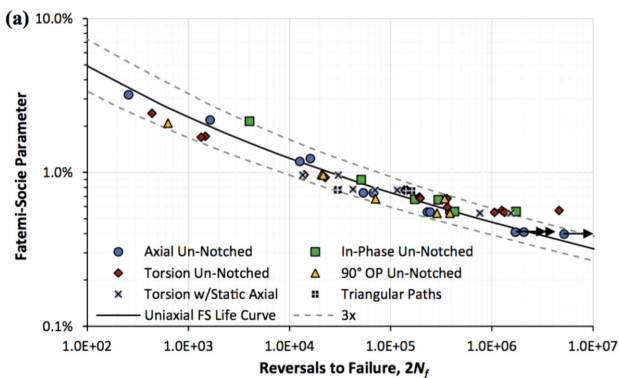


Рис. 7. График зависимости параметра Фатемиде – Соси от количества циклов до разрушения [31]

Fig. 7. Relationship of the Fatemi – Socie parameter and the fatigue life

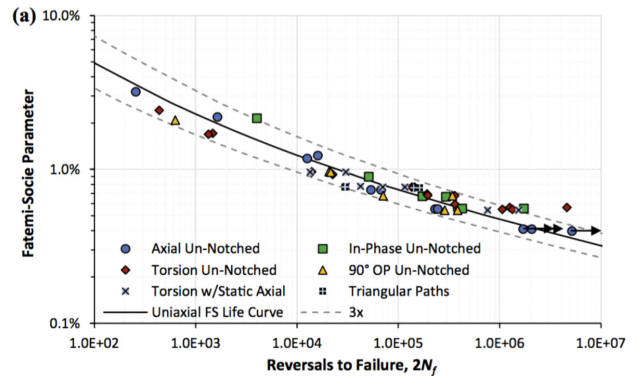


Рис. 8. График зависимости параметра Фатемиде – Соси (модификация) от количества циклов до разрушения [31]

Fig. 8. Relationship of the modified Fatemi – Socie parameter and the fatigue life

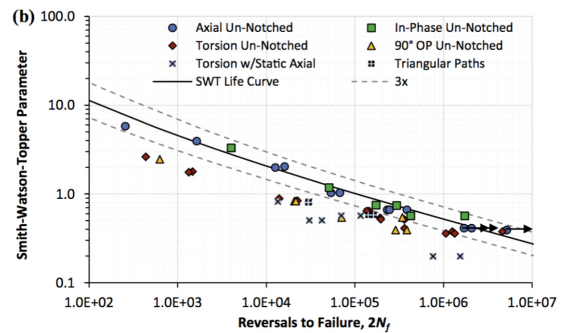


Рис. 9. График зависимости параметра Смита – Ватсона – Топпера от количества циклов до разрушения [31]

Fig. 9. Relationship of the Smith – Watson – Topper parameter and the fatigue life

Процентное содержание экспериментальных точек, лежащих внутри ± 2 и ± 3 факторных интерваловPercentage of experimental points within ± 2 and ± 3 factor error

№	Модель	«1»	«2»	«3»
		44 эксп. точки $\pm 2 / \pm 3$ факторные ошибки	31 эксп. точка $\pm 2 / \pm 3$ факторные ошибки	40 эксп. точек $\pm 2 / \pm 3$ факторные ошибки
1	Предложенная модель (уст. опыты 1)	84 % / 95 %	81 % / 94 %	43 % / 58 %
2	Сайнс (уст. опыты 1)	27 % / 68 %	58 % / 87 %	38 % / 60 %
3	Предложенная модель (уст. опыты 2)	82 % / 98 %	84 % / 94 %	53 % / 83 %
4	Сайнс (уст. опыты 2)	73 % / 98 %	81 % / 97 %	33 % / 63 %
5	Фатемиде – Сосиде	– / –	– / –	– / 88 %
6	Мод. Фатемиде – Сосиде	– / –	– / –	– / 90 %
7	Смит – Ватсон – Топпер	– / –	– / –	– / 55 %

Все результаты, представленные на рис. 3–9, сведены в общую табл. 3, в которой показано процентное содержание точек, лежащих внутри ± 2 и ± 3 факторных интервалов. Общее количество экспериментальных точек из статьи [28] – 44 шт. (столбец «1»), из статей [29–30] – 31 шт. (столбец «2»), из статьи [31] – 40 шт. (столбец «3»).

Как можно видеть из данных табл. 3, предложенная модель со вторым вариантом установочных опытов в целом дает хорошее согласование расчетных данных с экспериментальными для этих условий нагружения для алюминиевого сплава 2024. Также можно видеть, что модифицированная модель Фатемиде – Сосиде дает самое лучшее согласование расчетных данных с экспериментальными согласно источнику [31]. Однако следует отметить, что модифицированная модель Фатемиде – Сосиде достаточно сложна в реализации. При этом предложенный в данной статье подход использования второго варианта установоч-

ных опытов является более простым и показывает сопоставимую предсказательную способность.

Заключение

В рамках работы предложена модель многоосной усталости, позволяющая описать пропорциональные режимы нагружения. Показана описательная способность модели с использованием различных установочных опытов для определения констант. По результатам сопоставления разработанной модели с моделями Сайнса и Смита – Ватсона – Топпера показано, что разработанная модель в целом лучше описывает экспериментальные данные. Так же стоит отметить, что описательная способность разработанной модели сопоставима с критерием Фатемиде – Сосиде, однако представленная модель проще в использовании.

Библиографический список

1. Голуб В.П., Крижановский В.И., Пелых В.Н. Об одном методе расчета усталостной долговечности при комбинированном нагружении симметричным изгибом и кручением // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. – 2012. – № 66. – С. 32–37.
2. Application of the Theory of Critical Distances to predict the effect of induced and process inherent defects for SLM Ti-6Al-4V in High Cycle Fatigue / B. Gillham, A.S. Yankin, F. McNamara, C. Tomonto, D. Taylor, R. Lupoi // CIRP Annals Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 70 (1). – P. 171–174.
3. Fatigue behavior of foreign object damaged 7075 heat treated aluminum alloy coated with PVD WC/C / S. Baragetti, R. Gerosa, B. Rivolta, G. Silva, F. Tordini // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 10. – P. 3375–3380.
4. Ruschau J., Thompson S.R., Nicholas T. High cycle fatigue limit stresses for airfoils subjected to foreign object damage // International Journal of Fatigue. – 2003. – Vol. 25 (9–11). – P. 955–962.
5. Susmel L. Multiaxial notch fatigue: from nominal to local stress-strain quantities. – Cambridge, UK: Woodhead, 2009.
6. Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование влияния режимов двухосного циклического нагружения на усталостную долговечность алюминиевого сплава // Механика, ресурс и диагностика ма-

териалов и конструкций: сборник материалов XII Международной конференции. – Екатеринбург, 2018. – С. 376–377.

7. 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.

8. Thom M. The elastic-plastic response of aluminum alloys under multiaxial fatigue loading. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering [Электронный ресурс]. – Washington, 2007. – URL: <https://search.proquest.com/docview/1928557863/BVA507E3A1574DD9PQ/1?accountid=30414> (дата обращения: 17.01.2022).

9. Lu C., Melendez J., Martinez-Esnaola J.M. A universally applicable multiaxial fatigue criterion in 2D cyclic loading // International Journal of Fracture. – 2018. – Vol. 110. – P. 95–104.

10. Путятин А.Н., Черезов А.А. Основы механики разрушения: методические указания к самостоятельной работе. – Кемерово: КузГТУ, 2013. – 100 с.

11. Yankin A.S., Wildemann V.E., Mugatarov A.I. Influence of different loading paths on the multiaxial fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under the same amplitude values of the second invariant of the stress deviator tensor // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2021. – Vol. 55. – P. 327–335.

12. Zhang J., Shi X., Fei B. High cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A12-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading // *International Journal of Fatigue*. – 2012. – Vol. 38. – P. 144–154.

13. Biaxial fatigue behavior of gradient structural purity titanium under in-phase and out-of-phase loading / Q. Wang, C. Xin, Q. Sun, L. Xiao, J. Sun // *Int. J. Fatigue*. – 2018. – Vol. 116. – P. 602–609.

14. Crack initiation and propagation of 30CrMnSiA steel under uniaxial and multiaxial cyclic loading / T. Liu, X. Shi, J. Zhang, B. Fei // *Int. J. Fatigue*. – 2019. – Vol. 122. – P. 240–255.

15. Skibicki D., Pejkowski L. Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models // *Int. J. Fatigue*. – 2017. – Vol. 102. – P. 18–36.

16. Influence of the biaxial loading regimes on fatigue life of 2024 aluminum alloy and 40CrMnMo steel / V.E. Wildemann, M.P. Tretyakov, O.A. Staroverov, A.S. Yankin // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2018. – Vol. 4. – P. 169–177.

17. Mocilnik V., Gubeljak N. and Predan J. The Influence of a Static Constant Normal Stress Level on the Fatigue Resistance of High Strength Spring Steel // *Appl. Fract. Mech.* – 2017. – Vol. 91. – P. 139–147.

18. Influence of static mean stresses on the fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under multiaxial loading / A.S. Yankin [et al.] // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2020. – Vol. 14 (51). – P. 151–163.

19. Karolczuk A., Macha E. A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials // *International Journal of Fracture*. – 2005. – Vol. 134, № 3. – P. 267–304.

20. Шаманин Ю.А. Усталостная прочность – титановых сплавов при синфазном действии переменных нормальных и касательных напряжений // *Проблемы прочности*. – 1984. – № 12. – С. 26–27.

21. Jones J.D., Kurath P. Cyclic fatigue damage characteristics observed for simple loadings extended to multiaxial life prediction. – NASA Contractor Report 182126, 1988. – 102 p.

22. Evaluation and comparison of critical plane criteria for multiaxial fatigue analysis of ductile and brittle materials /

S.-P. Zhu [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2018. – Vol. 112. – P. 279–288.

23. Ma S., Markert B., Yuan H. Multiaxial fatigue life assessment of sintered porous iron under proportional and non-proportional loadings // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 97. – P. 214–226.

24. Kurek M., Lagoda T. Including of ratio of fatigue limits from bending and torsion for estimation fatigue life under cyclic loading // *Procedia Materials Science*. – 2016. – Vol. 12. – P. 30–35.

25. Kallmeyer R.A., Krgo A., Kurath P. Evaluation of multiaxial fatigue life prediction methodologies for Ti6Al4V // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 2002. – Vol. 124, № 2. – P. 229–237.

26. Reis L., Li and de Freitas M. Biaxial fatigue for proportional and non-proportional loading paths // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 27. – P. 775–784.

27. Щепакин Е.О. Критерии оценки многоциклового механической выносливости при сложном напряженном состоянии // *Молодой ученый*. – 2017. – № 21. – С. 163–168.

28. Xia T.-X., Yao W.-X. Comparative research on the accumulative damage rules under multiaxial block loading spectrum for 2024-T4 aluminum alloy // *International Journal of Fatigue*. – 2013. – Vol. 48. – P. 257–265.

29. A novel accumulative fatigue damage model for multiaxial step spectrum considering the variations of loading amplitude and loading path / T. Xia [et al.] // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 39. – P. 194–205.

30. Wang X.-W., Shang D.-G. Determination of the critical plane by a weight-function method based on the maximum shear stress plane under multiaxial high-cycle loading // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 90. – P. 36–46.

31. Gates N.R., Fatemi A. On the consideration of normal and shear stress interaction in multiaxial fatigue damage analysis // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 100. – P. 322–336.

32. Sines G., Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses // *National Advisory Committee for Aeronautics technical note 3495*. – 1955. – 72 p.

References

1. Golub V.P. On one method of calculating fatigue life under combined loading by symmetric bending and torsion. *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Mechanical engineering*, 2012, no. 66, pp. 32–37.

2. Gillham B., Yankin A.S., McNamara F., Tomonto C., Taylor D., Lupoi R. Application of the Theory of Critical Distances to predict the effect of induced and process inherent defects for SLM Ti-6Al-4V in High Cycle Fatigue. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2021, 70 (1), pp. 171–174.

3. Baragetti S., Gerosa R., Rivolta B., Silva G., Tordini F. Fatigue behavior of foreign object damaged 7075 heat treated aluminum alloy coated with PVD WC/C. *Procedia Engineering*, 2011, 10, pp. 3375–3380.

4. Ruschau J., Thompson S.R., Nicholas T. High cycle fatigue limit stresses for airfoils subjected to foreign object damage. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25 (9–11), pp. 955–962.

5. Susmel L. Multiaxial notch fatigue: from nominal to local stress-strain quantities. *Cambridge, UK: Woodhead*, 2009.

6. Vildeman V.E., Staroverov O.A., Tretyakov M.P. Experimental study of the effect of biaxial cyclic loading modes on the

fatigue life of an aluminum alloy. *Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures*, 2018, pp. 376–377.

7. Ilyinykh A.V., Vildeman V.E., Tretyakov M.P. Experimental study of the mechanical behavior of structural alloys under biaxial cyclic loading. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*, 2017, no. 51, pp. 115–123.

8. Thom M. The elastic-plastic response of aluminum alloys under multiaxial fatigue loading. *Washington, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering*, 2007 P

9. Lu, C. A universally applicable multiaxial fatigue criterion in 2D cyclic loading / C. Lu, J. Melendez, J.M. Martinez-Esnaola. *International Journal of Fracture*, 2018, vol. 110, pp. 95–104.

10. Putyatin A.N., Cherezov A.A. Fundamentals of fracture mechanics. *Kemerovo, KuzGTU, Electronic data*, 2013, 100 p.

11. Yankin A.S., Wildemann V.E., Mugatarov A.I. Influence of different loading paths on the multiaxial fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under the same amplitude values of the second invariant of the stress deviator tensor. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2021, 55, pp. 327–335

12. Zhang J., Shi X., Fei B. High cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A12-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 2012, 38, pp. 144-154.
13. Wang Q., Xin C., Sun Q., Xiao L., Sun J. Biaxial fatigue behavior of gradient structural purity titanium under in-phase and out-of-phase loading. *Int. J. Fatigue*, 2018, 116, pp. 602-609.
14. Liu, T., Shi, X., Zhang, J., Fei, B. Crack initiation and propagation of 30CrMnSiA steel under uniaxial and multiaxial cyclic loading. *Int. J. Fatigue*, 2019, 122, pp. 240-255.
15. Skibicki D., Pejkowski L. Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models. *Int. J. Fatigue*, 2017, 102, pp. 18-36.
16. Wildemann V.E., Tretyakov M.P., Staroverov O.A., Yankin A.S. Influence of the biaxial loading regimes on fatigue life of 2024 aluminum alloy and 40CrMnMo steel. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 169-177.
17. Mocilnik, V., Gubeljak, N. and Predan, J. The Influence of a Static Constant Normal Stress Level on the Fatigue Resistance of High Strength Spring Steel. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2017, 91, pp. 139-147.
18. Yankin A.S. et al. Influence of static mean stresses on the fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under multiaxial loading. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2020, 14 (51), pp. 151-163.
19. Karolczuk A., Macha E. A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials. *International Journal of Fracture*, 2005, vol. 134, no. 3, pp. 267-304.
20. Shamanin Yu.A., Fatigue strength of titanium alloys under in-phase action of alternating normal and tangential stresses. *Strength problems*, 1984, no. 12, pp. 26-27.
21. Jones J.D., Kurath P. Cyclic fatigue damage characteristics observed for simple loadings extended to multiaxial life prediction. *NASA Contractor Report 182126*, 1988, 102 p.
22. Zhu S.P. Evaluation and comparison of critical plane criteria for multiaxial fatigue analysis of ductile and brittle materials. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 112, pp. 279-288.
23. Ma S., Markert B., Yuan H. Multiaxial fatigue life assessment of sintered porous iron under proportional and non-proportional loadings. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 97, pp. 214-226.
24. Kurek M., Lagoda T. Including of ratio of fatigue limits from bending and torsion for estimation fatigue life under cyclic loading. *Procedia Materials Science*, 2016, vol. 12, pp. 30-35.
25. Kallmeyer A.R., Krgo A., Kurath P. Evaluation of multiaxial fatigue life prediction methodologies for Ti6Al4V. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2002, vol. 124, no. 2, pp. 229-237.
26. Reis, L. Biaxial fatigue for proportional and non-proportional loading paths / L. Reis, Li and M. de Freitas. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2004, vol. 27, pp. 775-784.
27. Shchepakina E.O. Criteria for evaluating high-cycle mechanical fatigue life under a complex stress state. *Young Scientist*, 2017, no. 21, pp. 163-168.
28. Xia T.X., Yao W.X. Comparative research on the accumulative damage rules under multiaxial block loading spectrum for 2024-T4 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 48, pp. 257-265.
29. Xia T. A novel accumulative fatigue damage model for multiaxial step spectrum considering the variations of loading amplitude and loading path. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2015, vol. 39, pp. 194-205.
30. Wang X.W., Shang D.G. Determination of the critical plane by a weight-function method based on the maximum shear stress plane under multiaxial high-cycle loading. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 90, pp. 36-46.
31. Gates N.R., Fatemi A. On the consideration of normal and shear stress interaction in multiaxial fatigue damage analysis. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 100, pp. 322-336.
32. Sines G., Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses. *National Advisory Committee for Aeronautics technical note 3495*, 1955, 72 p.

Финансирование. Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-01-00555 А). Экспериментальные исследования усталостной долговечности проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ ФСНМ-2020-0027).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Funding. The work was carried out at Perm National Research Polytechnic University with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-01-00555 A). Experimental studies of fatigue durability were carried out 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.