

# Пересмотр роли испытаний при нерегулярном нагружении при получении научных выводов о пределе выносливости<sup>1</sup>

## Reconsidering the Role of Fatigue Irregular Testing in Scientific Conclusions About the Fatigue Limit

Гадолина И.В.  
Gadolina I.V.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Российская Федерация  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russian Federation  
[gadolina@mail.ru](mailto:gadolina@mail.ru)



Гадолина И.В.

**Резюме. Цель.** Мы предлагаем метод использования испытания на усталость при нерегулярной нагрузке для изучения ключевых тем усталости материалов, а именно, касающихся предела усталости. Характеристику предел усталости важно знать: для ускорения испытаний; для обеспечения стабильного и надежного обслуживания машиностроительных изделий. **Методы.** Сравнительные исследования при блочных и случайных нагрузках предоставляют возможность исследователям делать соответствующие выводы без чрезмерного увеличения времени испытаний и без использования испытаний при сверхзвуковых частотах, которые в некоторой степени противоречивы. Мы приводим пример применения предложенного метода. Вторая стадия усталости, а именно стадия распространения трещины, также рассматривается. Основная идея аналогична – испытания при нерегулярной нагрузке дают возможность судить о максимуме среди малых амплитуд, которые не являются повреждающими. **Выводы.** Предложенный метод позволяет с использованием специальных видов испытаний получить ценную для инженеров и исследователей информацию, при этом испытания являются более приближенными к реальным условиям эксплуатации машин.

**Abstract. Aim.** We suggest a method of using the fatigue test in case of irregular loading for studying the key subject matters related to material fatigue, specifically those to do with fatigue limit. It is important to know the fatigue limit characteristic in order to speed up tests; in order to ensure stable and reliable servicing of machines. **Methods.** Comparative examinations in cases of block and random loadings enable researchers to make corresponding conclusions without excessively extending the duration of tests and without recurring to supersonic frequency tests that are to a certain degree controversial. An example of applying the proposed method is given. The second stage of fatigue, specifically the crack propagation stage, is also considered. The key idea is similar. Testing under irregular loading allows making conclusions regarding the maximum among small amplitudes that do not cause damage. **Conclusions.** The proposed method allows using special testing methods to obtain information that is valuable to engineers and researchers. The tests are also closer to the field conditions of machinery operation.

**Ключевые слова:** Механическая усталость, предел выносливости, блочная нагрузка, суммирование линейных повреждений, статистика.

**Keywords:** mechanical fatigue, durability limit, block loading, addition of linear damage, statistics.

**Для цитирования:** Гадолина И.В. Пересмотр роли испытаний при нерегулярном нагружении при получении научных выводов о пределе выносливости // Надежность. 2023. №3. С. 23-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-23-27>

**For citation:** Gadolina I.V. Reconsidering the Role of Fatigue Irregular Testing in Scientific Conclusions About the Fatigue Limit. Dependability 2023;3: 23-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-23-27>

**Поступила:** 29.03.2023 / **После доработки:** 06.07.2023 / **К печати:** 15.09.2023

**Received on:** 29.03.2023 / **Revised on:** 06.07.2023 / **For printing:** 15.09.2023

<sup>1</sup> Gadolina, I.V. Reconsidering the Role of Fatigue Irregular Testing in Scientific Conclusions About the Fatigue Limit. Journal of Graphic Era University, Vol. 10 1, 41–50. DOI: <https://doi.org/10.13052/jgeu0975-1416.1014>

## Введение

Исторически явление усталости (первоначально в металлах, а последние годы и в композитах) изучалось, когда образцы нагружались по синусоиде. Типичным примером регулярной нагрузки является синусоидальная нагрузка: частота ( $\omega$ ) и амплитуда ( $A$ ) постоянны:  $X(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ .

За последние десятилетия многое изменилось в практике испытаний на усталость. Все чаще ученые используют нерегулярные процессы. Нерегулярный процесс означает блочную и псевдо-случайную нагрузку (рис. 1, а и б).

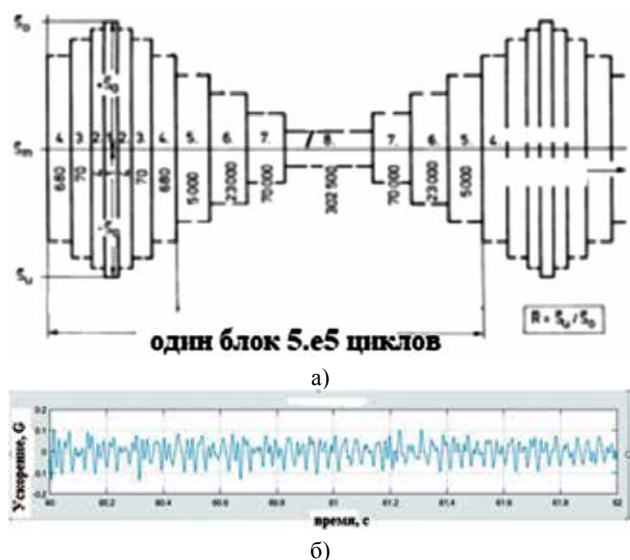


Рис. 1. Примеры блочной (а) и случайной (б) нагрузки. (1,б: Том Ирвин, инженер из Айовы, США, путешествовал на пароме 6 сентября 2021 года. Он записал следующие данные о вибрации, используя приложение акселерометра на своем Android Смартфон (Pixel 3 XL), который был помещен на небольшой столик между двумя сиденьями на пассажирской палубе).

Первоначально Гасснер предложил использовать блочную нагрузку для испытаний конструкций самолетов [1], а затем, с развитием технологии испытаний и программного обеспечения, все чаще использовались испытания при случайной нагрузке, поскольку они были ближе к фактической нагрузке машин в эксплуатации. Следует подчеркнуть, что методы испытаний развиваются, но методы расчета по большей части все еще тяготеют к базе, основанной на испытаниях при гармонической нагрузке.

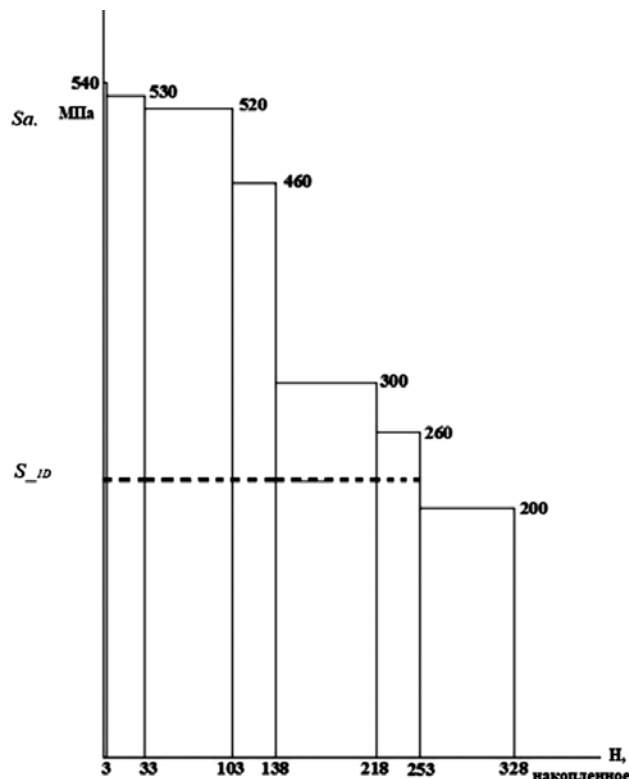
В настоящей статье далее показано, что можно судить о пороге повреждения, испытывая образцы при блочной нагрузке. Одной из тем, изучение которой представляется наиболее актуальным, является изучение порога (т.е. наибольшей из амплитуд напряжений, которые не влияют на накопление повреждений). Представляет интерес изучение этого явления как на стадии зарождения, так и на стадии распространения трещины [2]. Это важно:

а) с точки зрения ускорения испытаний – если напряжения не влияют на накопление повреждений, то от них можно отказаться во время испытаний;

б) для проведения расчетов долговечности с использованием обновленной информации о поведении кривой усталости в области гигацикловой долговечности.

Следует отметить, что проведение сертификационных испытаний только при гармонической нагрузке (построение обычной кривой усталости и кинетической диаграммы разрушения) больше не может удовлетворить пытливые умы ученых, изучающих усталость. Все больше исследователей склоняются к необходимости проведения испытаний при неравномерной нагрузке для определения свойств материала. Сундер [2] предлагает определить порог распространения трещины путем тестирования при неравномерной нагрузке в соответствии со специальной программой. Благодаря предложенному им подходу эксперимент не только очень близок к реальному рабочему нагружению, но и дает возможность изучить физику процесса распространения трещины. Таким образом, при испытании образцов алюминия с оригинальной псевдослучайной нагрузкой, основанной на стандарте TWIST, Сундер показал [2], как и каким именно образом чувствительное к последовательности остаточное напряжение вблизи вершины влияет на рост усталостной трещины.

Полученный результат позволил предложить метод оценки скорости роста трещины с учетом закрытия



трещины и влияния остаточных напряжений, образующихся при росте трещины. Относительно первой стадии усталости, а именно стадии зарождения трещины, мы можем упомянуть [3]. Чтобы преодолеть недостатки испытаний при регулярном нагружении, авторы [3] ввели так называемые «модельные кривые», которые основаны на нерегулярном тестировании в стандартных последовательностях (TWIST, FALSTAFF).

На рис. 2 показан блок нагрузки тракторной детали [4]. Некоторые нагрузочные ступени находятся ниже предела выносливости (пунктирная линия на рисунке). Основываясь на гипотезе линейного суммирования Майнера [5], они должны были бы быть отброшены в испытаниях и расчетах. Следует, однако, отметить, что есть два обстоятельства, которые препятствуют этому:

- 1) часто это отсутствие надежных данных о поведении кривой усталости для амплитуд напряжений, соответствующих сверхвысоких значениях циклов  $N > 10^8$ ;
- 2) отсутствие информации о явлении деградации материала под действием эксплуатационной нагрузки (т.е. поведения материалов при наличии перегрузок).

Существуют многочисленные примеры того, как материалы, ранее считавшиеся обладающими неограниченной выносливостью, преодолевая плато, снова демонстрировали отказы при сверхвысоких числах циклов [6, 7]. Пример результатов таких испытаний для композитов показан на рис. 3. Если ранее не было возможности проводить такие испытания, то с 1980-х годов появилась такая техническая осуществимость [8] и в настоящее время является очень распространенным методом испытаний.

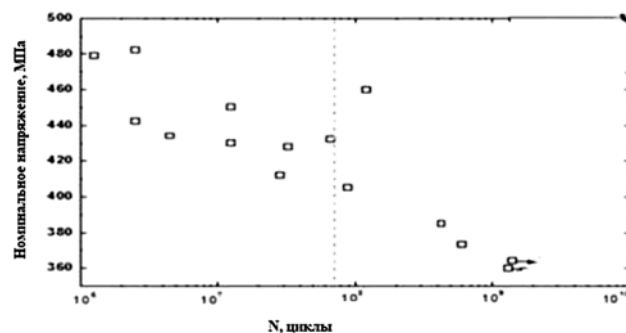


Рис. 3. Кривая усталости композитных образцов, изготовленных с использованием ультразвуковых частот нагружения [7].

## Примеры из испытаний и эксплуатации

Имеются экспериментальные данные, указывающие на изменение показателей при проведении нерегулярных испытаний, а именно, ухудшение свойств материалов при эксплуатационной нагрузке, при которой неизбежно присутствуют перегрузки. В [9], наряду с хорошо известной «вторичной» кривой усталости, также называется кривой Гасснера [1], вводится понятие расчетно-экспериментальной модифицированной кривой усталости. Уравнение указанной кривой построено на

основе экспериментальных данных при тестировании, по меньшей мере, двух уровней нерегулярной (т.е. блочной или случайной) загрузки образцов. О ходе этой кривой также можно судить по результатам испытаний.

На стадии зарождения усталостной трещины существует высокий риск превышения порогового напряжения (здесь это называется неограниченным пределом усталости). Возможно, эта концепция – просто удобная абстракция. Общеизвестным фактом является то, что для цветных металлов и алюминиевых сплавов не существует неограниченного предела долговечности. Исследования в области гигацикловой усталости, интенсивно проводившиеся в самом начале текущего тысячелетия, пролили некоторый свет на этот вопрос [6]. В давние времена академик Серенсен выдвинул гипотезу о постепенном снижении предела выносливости [10]. В то же время существует очень нечеткая грань между кривой вторичной усталости (кривая Гасснера) и кривой усталости при перегрузках.

Наблюдения за сбоями в обслуживании, а также за ростом трещин при эксплуатационных нагрузках часто очень информативны с точки зрения проверки научных гипотез. Например, в практике наблюдения за распространением трещин в элементах гидравлических трубопроводов [11] развитие трещин было замечено при амплитудах напряжений ниже предполагаемого порогового уровня. Одной из возможных причин является влияние крайне редких значительных перегрузок при пусках (10–20 пусков в год) на частоте рабочих амплитуд 50–100 Гц. Чтобы оценить повреждающий эффект малых амплитуд в условиях перегрузки, целесообразно провести испытания с ранее образовавшейся трещиной в соответствии с эксплуатационным (в данном случае двухчастотным) блоком нагружения.

По мнению экспертов, точность оценки долговечности на 70% зависит от определения нагрузок. Исследователям очень важно договориться о том, что важнее для усталости – распределение (и последовательность) экстремумов, обработанных далее методом «дождевого потока», или усредненная характеристика стандартного отклонения (и его частотное распределение – спектральная плотность). Ответ на этот вопрос определяет важные вопросы регистрации и обработки процессов случайной нагрузки, в частности, метод идентификации пиков [12]. Вопросы выбора режимов создания обобщенного блока для расчета требуют тщательного анализа повреждающего действия комбинаций факторов.

Некоторые режимы обслуживания оказывают настолько незначительный вредный эффект, что их можно считать временем простоя – время проходит, а ресурс не расходуется. В то же время нельзя игнорировать фактор естественного старения материалов. Это явление характерно для композитов даже в большей степени, чем для металлов. Чтобы оценить изменчивость оценки, авторы предлагают использовать в расчетах метод адресных матриц Маркова [13]. Для оценки разброса усталостной долговечности на стадии распространения усталостной

трещины авторы используют метод моделирования пиков на основе целевых матриц Маркова, который позволит ориентироваться в выборе доступных моделей оценки на основе качественного эксперимента. Для анализа методов, основанных на спектральной плотности, требуется метод моделирования непрерывного процесса последовательностью экстремумов [14].

На рис. 4 мы схематично изобразили алгоритм, который позволяет моделировать случайную последовательность пиков для испытаний по адресной матрице Маркова. Выбор следующего экстремума в ряду выполняется на основе целевой матрицы, аналогичной по форме, показанной на рис. 4. Алгоритм использует генератор случайных чисел.

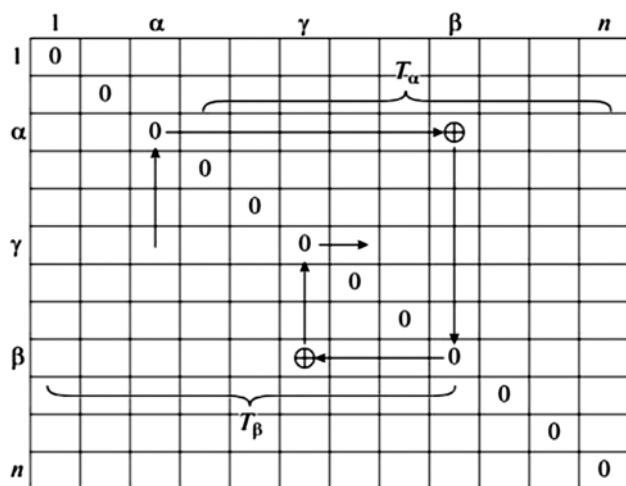


Рис. 4. Метод формирования случайной последовательности пиков по адресной матрице Маркова

## Метод

Автор статьи предлагает метод, который позволяет делать выводы о поведении кривой усталости на основе эксплуатационных и лабораторных испытаний при неравномерной нагрузке, как более близкий к реальности. Такие испытания, благодаря наличию вибраций с малыми амплитудами в процессах нагружения, могут позволить косвенно оценить их вклад как на стадии зарождения, так и на стадии распространения трещины. Такое исследование также важно с точки зрения сокращения времени тестирования. В [9] для оценки параметров модифицированной кривой усталости  $A^*$  и  $m^*$  в виде уравнения Баскуина:

$$\lg(N) = A^* - m^* \cdot \lg(\sigma_a) \quad (1)$$

было предложено минимизировать ошибку линейной гипотезы методом наименьших квадратов:

$$\Psi = \sum_{i=1}^k \left[ \lg\left(\sum_{j=1}^{\omega} \sigma_{aij}^{m^*}\right) - A^* \right]^2, \quad (2)$$

где  $n_i$  – число циклов с амплитудой  $\sigma_{ai}$  до разрушения. Поверхность ошибки для одной из выполненных серий испытаний при нерегулярной нагрузке выглядит следующим образом (рис. 5):

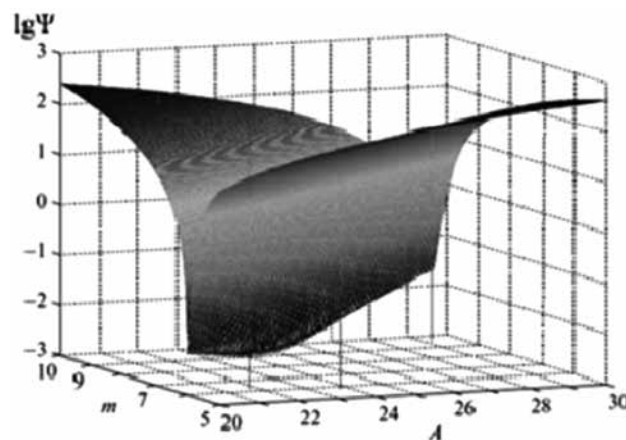


Рис. 5. Поверхность ошибки решения системы (2). Решение находится в точке минимума функции ошибки.

Значения ( $m^* = 6,8$  и  $A^* = 21,5$ ), обеспечивающие минимум  $\Psi$ , будут служить новыми константами в уравнении Баскуина (1). Это гарантирует несмещенную оценку долговечности по гипотезе Майнера для будущих расчетов.

## Заключение

В этой статье мы хотели привлечь внимание читателей к возможности и полезности исследования усталостных свойств материалов при нерегулярном нагружении. Было показано, что при грамотно спланированном эксперименте можно получить важные результаты, касающиеся минимального порога напряжений при накоплении усталостных повреждений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

## Библиографический список

1. Sonsino C.M., Heim R, Melz T. Lightweight-Structural Durability Design by Consideration of Variable Amplitude Loading // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 91. Part 2. Pp. 328-336. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.030
2. Sunder R. et al. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 82. Part 3. Pp. 667-675.
3. Bautin A. et al. Model curves: a simple way to account for complex effects. In Proc. 32nd Congress of International Council of Aeronautical Science. Sept. 6-10, 2021, Shanghai, China.
4. Березин И.Я., Рихтер Е.Е., Абызов А.А. и др. Статистическая механика и надежность машин: Учебное пособие к курсовому проекту. Челябинск: ЮрГу, 2003. 59 с.
5. Miner M.A. Cumulative Damage in Fatigue // Journal of Applied Mechanics. 1944. Vol. 3. Pp. 159-164.
6. Bathias C. There is no infinitive fatigue life in metallic materials // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1999. Vol 22. Issue 7. Pp. 559-566.



7. Wei Xu et al. An Ultra-High Frequency Vibration-Based Fatigue Test and Its Comparative Study of a Titanium Alloy in the VHCF Regime // *Metals*. 2020. Vol. 10. P. 1415. DOI: 10.3390/met10111415
8. Stanzl-Tschegg S. Fatigue crack growth and threshold measured at very high frequencies (20 kHz) // *Metal Science*. 1980. Vol. 14(4). Pp. 137–143.
9. Makhutov N.A., Petrova I.M., Gadolina I.V. et al. On peculiarities in construction of a modified fatigue curve // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2010. Vol. 39. No. 4. Pp. 338–342.
10. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Расчеты несущей способности и прочности деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
11. Georgievskaya E. The Problem of Early Crack Detection in the Runner Blades of Hydraulic Units // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021. Vol. 50. No. 3. P. 216.
12. Gadolina I.V., Lisachenko N.G., Svirskiy Y. et al. The Choice of Sampling Frequency and Optimal Method of Signals Digital Processing in Problems of a Random Loading Process Treating to Assess Durability // *Inorganic Materials*. 2020. Vol. 56(15). Pp. 1551–1558. DOI: 10.1134/S0020168520150054
13. Makhutov N.A. et al. Imitation of Random Sequences of Extremums in Fatigue Tests with Irregular Loading // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40(8). Pp. 614–621. DOI: 10.3103/S1068798X2008016X
14. Makhutov N.A. et al. Simulation of Random Processes in the Fatigue Problem under Variable Loading // *Strength of Materials*. 2021. Vol. 52(8). Pp. 953–957. DOI: 10.1007/s11223-021-00249-3

## References

1. Sonsino C.M., Heim R, Melz T. Lightweight-Structural Durability Design by Consideration of Variable Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue* 2016;91(2):328–336. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.030.
2. Sunder R. et al. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis. *International Journal of Fatigue* 2016;82(3):667–675.
3. Bautin A. et al. Model curves: a simple way to account for complex effects. In: Proc. 32nd Congress of International Council of Aeronautical Science. Shanghai (China); 2021.
4. Berezin I.Ya., Rikhter E.E., Abyzov A.A. et al. [Statistical mechanics and dependability of machines: a study guide for a course project]. Chelyabinsk: YurGU; 2003. (in Russ.)
5. Miner M.A. Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics* 1944;3:159–164.
6. Bathias C. There is no infinitive fatigue life in metallic materials. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 1999;22(7):559–566.
7. Wei Xu et al. An Ultra-High Frequency Vibration-Based Fatigue Test and Its Comparative Study of a Titanium

Alloy in the VHCF Regime. *Metals* 2020;10:1415. DOI: 10.3390/met10111415.

8. Stanzl-Tschegg S. Fatigue crack growth and threshold measured at very high frequencies (20 kHz). *Metal Science* 1980;14(4):137–143.
9. Makhutov N.A., Petrova I.M., Gadolina I.V. et al. On peculiarities in construction of a modified fatigue curve. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* 2010;39(4):338–342.
10. Serensen S.V., Kogaiev V.P., Shneydervich R.M. [Calculations of the carrying capacity and strength of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie; 1975. (in Russ.)
11. Georgievskaya E. The Problem of Early Crack Detection in the Runner Blades of Hydraulic Units. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* 2021;50(3):216.
12. Gadolina I.V., Lisachenko N.G., Svirskiy Y. et al. The Choice of Sampling Frequency and Optimal Method of Signals Digital Processing in Problems of a Random Loading Process Treating to Assess Durability. *Inorganic Materials* 2020;56(15):1551–1558. DOI: 10.1134/S0020168520150054.
13. Makhutov N.A. et al. Imitation of Random Sequences of Extremums in Fatigue Tests with Irregular Loading. *Russian Engineering Research* 2020;40(8):614–621. DOI: 10.3103/S1068798X2008016X.
14. Makhutov N.A. et al. Simulation of Random Processes in the Fatigue Problem under Variable Loading. *Strength of Materials* 2021;52(8):953–957. DOI: 10.1007/s11223-021-00249-3.

## Сведения об авторе

**Гадолина Ирина Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: gadolina@mail.ru

## About the author

**Irina V. Gadolina**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: gadolina@mail.ru.

## Вклад автора

Автором был проведен обзор литературы по теме исследования, проанализировано влияние особенностей нагружения на поведение материалов в многоциклового области усталости, предложено использовать информацию о сопротивлении усталости при нерегулярном нагружении для корректировки информации о поведении кривой усталости

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.