

УДК 621.01:539.431

doi:10.18720/SPBPU/2/id-165

К.А. Бадиков<sup>1</sup>, А.Н. Савкин<sup>2</sup>, А.И. Лебедев<sup>3</sup>, А.А. Седов<sup>4</sup>

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ В РАЗЛИЧНОМ СТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ**



<sup>1</sup>Кирилл Андреевич Бадиков

Волгоградский государственный технический университет  
Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-80-13, E-mail: badikov\_kirill@mail.ru



<sup>2</sup>Алексей Николаевич Савкин

Волгоградский государственный технический университет  
Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: savkin@vstu.ru



<sup>3</sup>Али Исмоилович Лебедев

Волгоградский государственный технический университет  
Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: djalixsander@gmail.com



<sup>4</sup>Александр Александрович Седов

Волгоградский государственный технический университет  
Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: sed0ff@yandex.ru

### **Аннотация**

Исследована кинетика роста усталостной трещины в титановом сплаве ВТ6 ( $\alpha+\beta$  структура) при внешнем нерегулярном (квазислучайном) циклическом нагружении. Показаны экспериментальные результаты роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) для разных структурных состояний сплава (глобулярной и пластинчатой микроструктуре) при циклическом нагружении компактных образцов типа С(Т) толщиной 5 мм. Предложена методика оценки характера нерегулярного нагружения с помощью коэффициента нерегулярности. Отмечено, что кинетика роста трещины во многом

зависит от вида последовательностей амплитуд переменного нагружения, а также от структуры сплава.

*Ключевые слова:* титановый сплав, усталостная трещина, спектральное нагружение, скорость роста трещины.

## **Введение**

При эксплуатации сложных технических объектов, работающих при переменном внешнем силовом воздействии возникает проблема оценки срока службы при накоплении в структуре металла конструктивных элементов усталостных повреждений, способствующих деградации его механических характеристик, зарождению и росту усталостных трещин. При обнаружении с помощью неразрушающего контроля в деталях такого рода дефекта встает вопрос о выбраковке такого элемента. Однако это не всегда целесообразно с экономической точки зрения. В ряде конструкций допускается ее эксплуатация с усталостной трещиной. Именно поэтому в практике введен принцип конструирования и эксплуатации отдельных деталей и конструкций в целом по безопасному повреждению [1,2]. Трещина должна быть своевременно выявлена до наступления предельного состояния, определяемого переходом к быстрому и неуправляемому разрушению. На первый план выходит представление о длительности последующего, после обнаружения, роста трещины в эксплуатации до критических размеров. Получить такую информацию можно на основании анализа скорости роста трещины в эксплуатации на основании подходов механики разрушения к определению предельного состояния тел с трещинами [1,2]. Это дает возможность установить более точные прогнозы долговечности материалов с трещинами, возможность снижения металлоемкости при проектировании конструкции и увеличивает достоверность принятия решения о сроках принятия решений о планировании промежуточных осмотров и продления ресурса технического объекта.

Целью работы является изучение кинетики роста усталостной трещины при квазислучайном нагружении, имитирующем эксплуатационное нагружение титанового сплава ВТ6 в разном структурном состоянии и математическое моделирование продолжительности роста трещины по предлагаемой модели.

## **Материал, образцы, методика проводимых испытаний**

Для испытания использовали титановый сплав ВТ6, имеющий полиморфную структуру, состоящую из смеси твердых растворов  $\alpha$ -фазы с

ГПУ и  $\beta$ -фазы с ОЦК кристаллическими решетками. Он может подвергаться термической обработке для получения различного структурного состояния с разными механическими свойствами. Химический состав исследуемого титанового сплава определен на основании рентгенофлуоресцентного анализа на энергодисперсионном спектрометре Shimadzu серии EDX-8000 и показан в таблице 1.

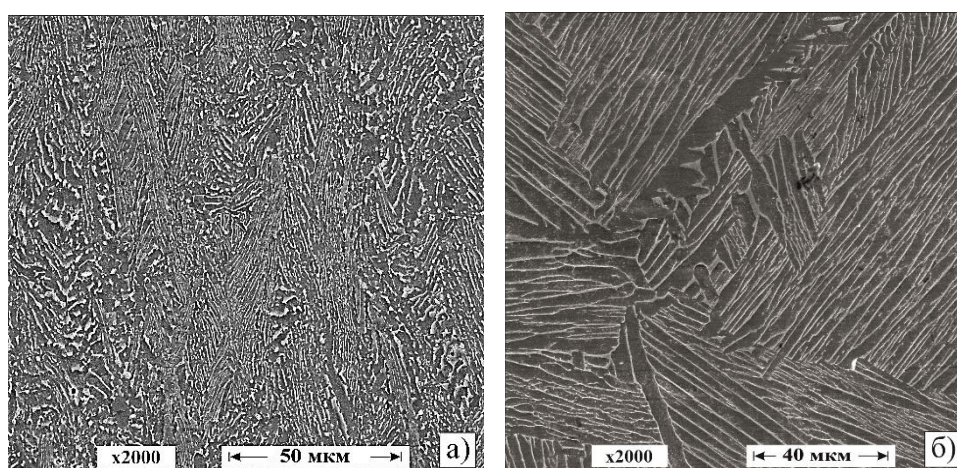
**Таблица 1.** Химический состав исследуемого титанового сплава ВТ6

| Титановый сплав | Тип структуры  | Химический состав в % |           |          |           |           |
|-----------------|----------------|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
|                 |                | <i>Ti</i>             | <i>AL</i> | <i>V</i> | <i>Si</i> | <i>Fe</i> |
| ВТ6             | $\alpha+\beta$ | 91.25                 | 5.16      | 2.71     | 0.78      | 0.1       |

Формирование структуры титанового сплава ВТ6. Для оценки влияния структурного состояния титанового сплава на кинетику роста усталостной трещины в условиях переменного нагружения, на основании рекомендаций [3, 4], была проведена термическая обработка образцов для формирования глобулярной и пластинчатой структуры сплава ВТ6. Виды термической обработки показаны в таблице 2, а полученная микроструктура на рис. 1.

**Таблица 2.** Механические свойства сплава ВТ6 в различном структурном состоянии

| Сплав | Виды термообработки                        | Наименование структуры | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $E$ , ГПа |
|-------|--------------------------------------------|------------------------|------------------|----------------------|--------------|-----------|
| ВТ-6  | исходный                                   | глобулярная            | 985              | 974                  | 6.7          | 121       |
| ВТ-6  | $\beta$ отжиг 900°<br>1 час+1025°1 час, ОП | пластинчатая           | 804              | 764                  | 1.75         | 115       |



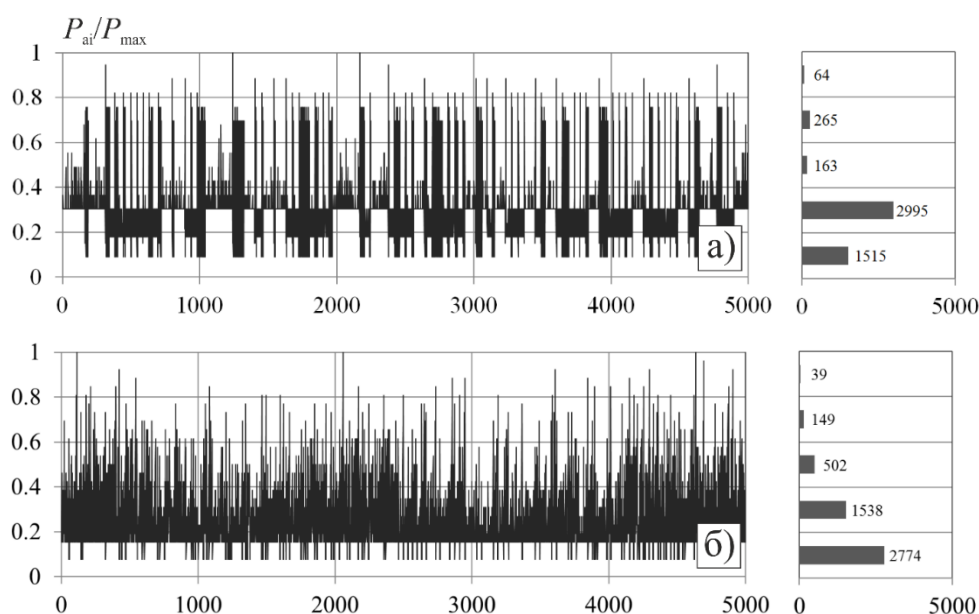
**Рис. 1.** Микроструктура титанового сплава ВТ6 в различном структурном состоянии:  
а) глобулярная, б) пластинчатая

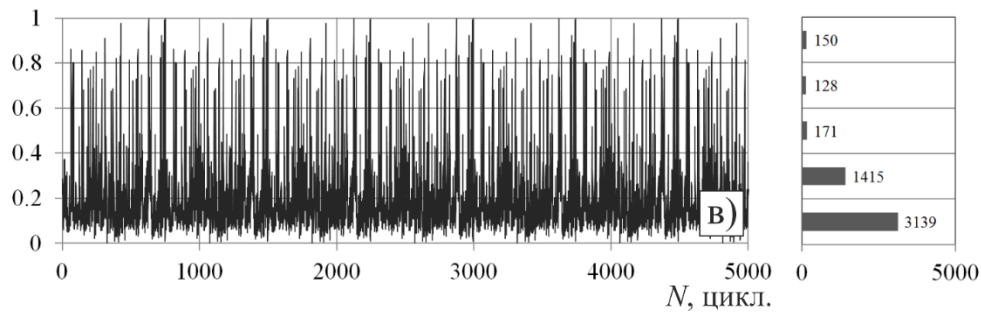
Для испытаний на распространение трещины было использована сервогидравлическая машина Biss-Nano 25 kN с приложением VAFCP (Variable Amplitude Fatigue Crack Propagation), позволяющим проводить нагружение, согласно представленной в данной статье программе испытаний. Методика испытаний соответствовала требованиям ASTM E647-08 [5]. Использовались компактные образцы типа С(Т). Они были изготовлены из листового проката толщиной 5 мм. Предварительное растрескивание для всех испытаний проводилось с параметрами:  $P_{max}=3$  кН,  $R=0.1$ ,  $a_0=14$  мм.

## Выбор программы испытания

Если материал испытываемого изделия испытывает стационарное нагружение с постоянными параметрами циклического нагружения, то продолжительность роста усталостной трещины можно определить на основании механики разрушения и построения кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Однако, если нагружение носит нерегулярный характер, полученный на основании случайных выборок эксплуатационной нагруженности, процесс оценки ресурса усложняется [6, 7,8].

В программное обеспечение испытательной машины были заложены блоки квазислучайного нагружения [9]: MTW (miniTWIST), соответствующий нагружению крыла транспортного самолета, MFS (miniFALSTAFF) – нагружение крыла боевого истребителя, Saenrans – нагружение подвески автомобиля. Продолжительность укороченной версии спектров составляла 5000 циклов, их вид представлен на рис. 2.





**Рис. 2.** Спектры нагружения: а) MTW; б) MFS; в) Saetrans

Различие спектров нагружения для программных испытаний оцениваются по ГОСТ 25.507-85 с помощью меры полноты спектра  $V$ , определяемой по формуле:

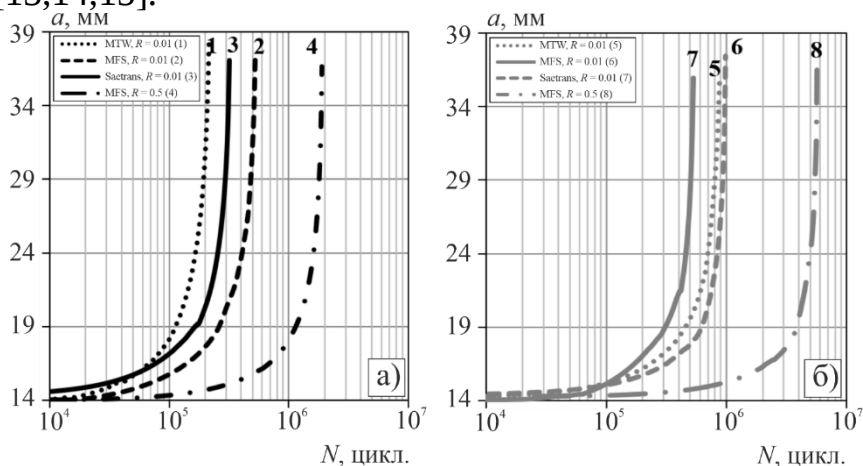
$$V = \left[ \frac{1}{v_{\delta}} \left[ \sum_{i=1}^r \left[ v_{ai} \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \right)^n \right] \right] \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_{a\max}$  – параметры переменного напряжения,  $v_{\delta}$ ,  $v_{ai}$  – продолжительность блока нагружения и отдельных его амплитуд напряжений,  $n$  – коэффициент наклона кривой КДУР в координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K$  [8,10]. Оценив характер нерегулярного нагружения и рассмотрев КДУРы для разных материалов в блоках с переменной нагрузкой различного характера, можно отметить, что на расположение этих кривых в многом определяется величиной меры нерегулярности нагружения  $V$  [10,11,12]. Получены значения  $V$  для испытываемых спектров:  $MTW = 0.379$ ,  $MFS = 0.348$ ,  $Saetrans = 0.36$ .

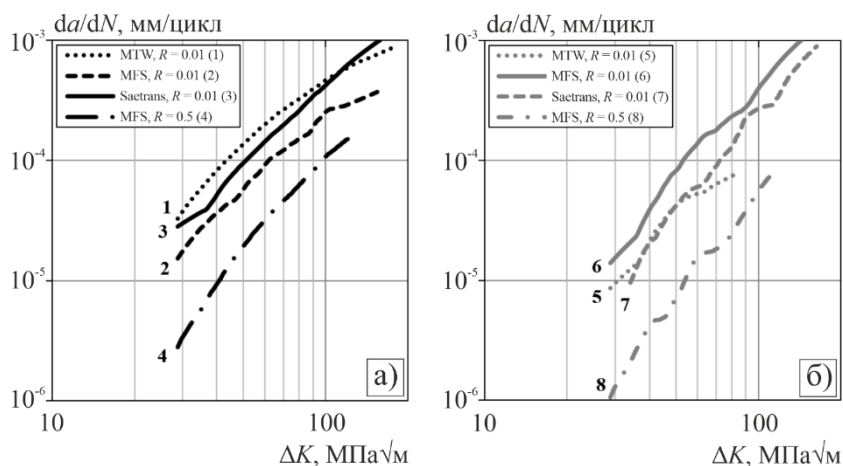
## Результаты и обсуждение

Результаты испытания титанового сплава ВТ6 представлены на рисунках 3 и 4 и в таблице 3. Во всех испытаниях в блоках нагружения  $P_{\max}$  составляло 6 кН. Коэффициенты асимметрии для всех испытаний составили  $R = 0.01$ . Для оценки влияния асимметрии  $R$  для различных структурных состояний, кроме того, было проведено испытание с  $R=0.5$  со спектром MFS. При испытаниях и прочих равных условиях с  $R= 0.01$  наибольшим повреждающим воздействием для глобулярной структуры служит спектр MTW, с долговечностью  $N = 220000$  циклов. Для пластинчатой структуры – спектр Saetrans, долговечность роста трещины с которым составила  $N = 527436$  циклов. Следует заметить, что все используемые спектры при  $R = 0.01$  показали меньшую долговечность для глобулярной структуры по сравнению с пластинчатой, что в первую очередь связано с большей прочностью глобулярной структуры по

сравнению с пластинчатой. Увеличение продолжительности роста трещины для спектра MFS для всех структурных состояний для  $R = 0.5$  и постоянства  $P_{\max} = 6$  кН связано с уменьшением амплитуд случайного нагружения [13,14,15].



**Рис. 3.** Кривые роста трещины для испытаний при спектральном нагружении для титанового сплава ВТ6 с различной структурой: а) глобулярная, б) пластинчатая



**Рис. 4.** КДУР для испытаний при спектральном нагружении для титанового сплава ВТ6 с различной структурой: а) глобулярная, б) пластинчатая

Исследование полученных КДУР (рис. 4); позволяет выделить следующее:

1 - КДУР для исследуемых спектров нагружения для разных структур эквидистантны.

2 - КДУР для кривых роста трещин с наибольшей продолжительностью расположены ниже других кривых с большей интенсивностью роста.

Негладкий характер кривых КДУР объясняется характером снятия показаний кинетики роста трещины тензометром, что вызывает необходимость их сглаживания при обработке записи экспериментальных данных с помощью программных средств. Это никак не снижает достоверность получаемых результатов [16, 17, 18].

**Таблица 3.** Программа исследований титанового сплава ВТ6 с различной структурой при квазислучайном нагружении

| № п/п | Структура    | Нагружение (спектр) | $P_{\max}$ , | $R$  | $N_{\text{эксп}}$ |
|-------|--------------|---------------------|--------------|------|-------------------|
| 1     | Глобулярная  | MTW                 | 6            | 0,01 | 215439            |
| 2     |              | MFS                 | 6            | 0,01 | 524991            |
| 3     |              | Saetrans            | 6            | 0,01 | 320605            |
| 4     |              | MFS                 | 6            | 0,5  | 1893800           |
| 5     | Пластинчатая | MTW                 | 6            | 0,01 | 877582            |
| 6     |              | MFS                 | 6            | 0,01 | 985387            |
| 7     |              | Saetrans            | 6            | 0,01 | 527436            |
| 8     |              | MFS                 | 6            | 0,5  | 4519807           |

### Заключение

Влияние последовательностей циклов при взаимодействии переменных нагрузок на кинетику роста усталостных трещин связано с прохождением трещины через пластическую зону вблизи ее устья и формирования в ней остаточных напряжений. Проведена термическая обработка титанового сплава ВТ-6 для получения глобулярного и пластинчатого структурного состояния. Построение КДУР при переменном нагружении сплава ВТ6 с разным структурным состоянием показала, что структурное состояние влияет в первую очередь на изменение коэффициента  $C$  кривых КДУР. Так для глобулярной структуры  $C_1 = 4.1 \cdot 10^{-13}$ , пластинчатой  $C_2 = 1.6 \cdot 10^{-13}$ . Угол наклона кривых КДУР можно принять равным  $n = 3.35$ . Влияние каждого спектра в распространение трещины предлагается оценивать мерой нерегулярности  $V$ .

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (РНФ), проект 23-79-01269.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2011. Vol. 9, №1.
- [2] Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 328 с.
- [3] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
- [4] Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
- [5] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.

- [6] Бойцов Б.В., Кравченко Г.Н., Петухов Ю.В., Кравченко К.Г. Кинетика развития трещин в поверхностно упрочненных деталях. Часть 2. Качество и жизнь. 2023. № 1(37). С. 35-38. DOI 10.34214/2312-5209-2023-37-1-35-38.
- [7] Elber W., Smith C. W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures. ASTM STP 486. 1971. P. 230-242.
- [8] Schijve J., Newman J. C., Elber W. Fatigue crack closure: Observations and technical significance. ASTM STP 982. 1988. P. 5-35.
- [9] Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2012. Vol. 9. №1. 32 p.
- [10] Савкин А.Н., Андроник А.В., Бадиков К.А., Седов А.А. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали. Деформация и разрушение материалов. 2017. № 7. С. 40-45.
- [11] Туманов Н. В. Стадийность кинетики усталостных трещин: закономерности и особенности. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 1. С. 58-71. DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-1-58-71.
- [12] Prakash R. V. Fatigue crack growth at stress concentrators under spectrum loading. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2005. Vol. 40, No. 2. P. 117-127. DOI 10.1243/030932405X7764.
- [13] Masoudi Nejad R., Berto F. Fatigue crack growth of a railway wheel steel and fatigue life prediction under spectrum loading conditions. International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 157. P. 106722. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.106722.
- [14] Cheng Zh. Q., Tan W., Xiong Ju. J. Modelling fatigue behaviours and lifetimes of novel GLARE laminates under random loading. Composite Structures. 2023. Vol. 311. P. 116799. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.116799.
- [15] Fu D., Li P., Sun J., Yao W. Fatigue Crack Propagation Life of Metallic Materials Under Random Loading: A Coupling Analysis Method in the Frequency Domain. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2024. Vol. 47, No. 12. P. 4650-4659. DOI 10.1111/ffe.14455/
- [16] Савкин А.Н., Денисевич Д.С., Бадиков К.А., Седов А.А. A new semi-analytical approach for obtaining crack-tip stress distributions under variable-amplitude loading. Procedia Structural Integrity. Vol. 14: SICE 2018 (2nd International Conference on Structural Integrity and Exhibition 2018). [Publisher: Elsevier], 2019. P. 684-687.
- [17] Завойчинская Э. Б. Долговечность конструкционных материалов при переменном нагружении. Вестник Московского университета. Серия

1: Математика. Механика. 2025. № 1. С. 84-95. DOI 10.55959/MSU0579-9368-1-66-1-11.

- [18] Агамиров Л. В. Вестяк В. А., Агамиров В. Л., Петров А. Н. Расчет долговечности при нерегулярном нагружении методом снижения предела выносливости. 2023. Т. 85, № 4. С. 510-521. DOI 10.32326/1814-9146-2023-85-4-510-521.

K.A. Badikov, A.N. Savkin, A.I. Lebedev, A.A. Sedov

## INVESTIGATION OF FATIGUE CRACK GROWTH IN TITANIUM ALLOY IN VARIOUS STRUCTURAL STATES UNDER IRREGULAR LOADING

Volgograd State Technical University, Russia

### Abstract

The kinetics of fatigue crack growth in titanium alloy VT6 ( $\alpha+\beta$  structure) under external irregular (quasi-random) cyclic loading is investigated. Experimental results of fatigue crack growth and kinetic diagrams of fatigue failure for different structural states of the alloy (globular and lamellar microstructure) under cyclic loading of compact samples of type C(T) with a thickness of 5 mm are shown. A method for assessing the nature of irregular loading using the irregularity coefficient is proposed. It is noted that the kinetics of crack growth largely depends on the type of sequences of amplitudes of variable loading, as well as on the structure of the alloy.

*Key words:* Ti-alloy, fatigue crack, spectral loading, crack growth rate.

### REFERENCES

- [1] Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2011. Vol. 9, №1.
- [2] Matvienko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. Moscow.: FIZMATLIT, 2006. 328 p.
- [3] Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Handbook. Moscow.: VILS-MATI, 2009. 520 p.
- [4] Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. X-ray and electron-optical analysis. Moscow.: MISIS, 2002. 360 p.
- [5] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.
- [6] Boytsov B.V., Kravchenko G.N., Petukhov Yu.V., Kravchenko K.G. Kinetics of crack development in surface-hardened parts. Part 2. Quality

- and Life. 2023. № 1(37). P. 35-38. DOI 10.34214/2312-5209-2023-37-1-35-38.
- [7] Elber W., Smith C. W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures. ASTM STP 486. 1971, pp. 230-242.
  - [8] Schijve J., Newman J. C., Elber W. Fatigue crack closure: Observations and technical significance. ASTM STP 982. 1988, pp. 5-35.
  - [9] Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2012. Vol. 9. №1. 32 p.
  - [10] Savkin A.N., Andronik A.V., Badikov K.A., Sedov A.A. Evaluation of the influence of the nature of loading and force parameters of random external action on the growth of a fatigue crack in low-alloy steel. Deformaciya i razrushenie materialov. 2017. № 7, pp. 40-45.
  - [11] Tumanov N.V. Stages of fatigue crack kinetics: patterns and features. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2024. T. 90, № 1. Vol. 58-71. DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-1-58-71.
  - [12] Prakash R. V. Fatigue crack growth at stress concentrators under spectrum loading. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2005. Vol. 40, No. 2. P. 117-127. DOI 10.1243/030932405X7764.
  - [13] Masoudi Nejad R., Berto F. Fatigue crack growth of a railway wheel steel and fatigue life prediction under spectrum loading conditions. International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 157. P. 106722. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.106722.
  - [14] Cheng Zh. Q., Tan W., Xiong Ju. J. Modelling fatigue behaviours and lifetimes of novel GLARE laminates under random loading. Composite Structures. 2023. Vol. 311. P. 116799. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.116799.
  - [15] Fu D., Li P., Sun J., Yao W. Fatigue Crack Propagation Life of Metallic Materials Under Random Loading: A Coupling Analysis Method in the Frequency Domain. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2024. Vol. 47, No. 12, pp. 4650-4659. DOI 10.1111/ffe.14455/
  - [16] Savkin A.N., Denisevich D.S., Badikov K.A., Sedov A.A. A new semi-analytical approach for obtaining crack-tip stress distributions under variable-amplitude loading. Procedia Structural Integrity. Vol. 14: SICE 2018 (2nd International Conference on Structural Integrity and Exhibition 2018). [Publisher: Elsevier], 2019, pp. 684-687.
  - [17] Zavoichinskaya E. B. Durability of structural materials under variable loading. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mehanika. 2025. №1, pp.84-95. DOI 10.55959/MSU0579-9368-1-66-1-11.
  - [18] Agamirov L. V., Vestyak V. A., Agamirov V. L., Petrov A. N. Calculation of durability under irregular loading by the method of reducing the fatigue limit.. Problemy prochnosti i plastichnosti. 2023. Vol. 85, № 4, pp. 510-521. DOI 10.32326/1814-9146-2023-85-4-510-521.