

УДК 621.785.531

М. Н. Пищов, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук
Белорусский государственный технологический университет
**ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ**

В статье исследована возможность использования высокочастотного циклического нагружения для проведения усталостных испытаний алюминиевого сплава АК8МЗ, полученного с использованием вторичного алюминиевого сырья. Приведены схемы стендов для проведения испытаний и методика определения усталостных характеристик металлических материалов. Установлено совпадение распределения усталостных трещин с максимумом величины циклических напряжений. Показано, что использование высокочастотного нагружения позволяет проводить сравнительные испытания конструкционных материалов с существенным ускорением процесса исследования и с повышенной достоверностью результатов за счет большего количества испытанных объектов при приемлемом уровне трудозатрат и экономии энергоресурсов.

Экспериментально установлена оптимальная величина процентного содержания железа в исследуемом сплаве АК8МЗ с точки зрения уровня его усталостных свойств, которую можно принять в пределах 1%, с допустимой величиной отклонения не более 0,5% Fe. Можно предположить, что данное влияние примеси железа сохранится и для различных видов обработки поверхности такого сплава. Проведение фрактографического анализа изломов образцов заключалось в определении и последующем установлении основных причин разрушения материала. Как правило, визуальное изучение поверхности изломов позволило установить место начала разрушения и характер его дальнейшего протекания.

Выявлено, что использованные в данной работе параметры лазерной технологии упрочнения не могут быть рекомендованы для повышения уровня усталостных характеристик исследованного сплава.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, усталостные характеристики, усталостные испытания, лазерная обработка, усталостные трещины, излом, структура.

Для цитирования: Пищов М. Н., Бельский С. Е., Царук Ф. Ф. Фрактографический анализ высокочастотных усталостных изломов // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 2 (270). С. 238–244. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-28.

M. N. Pishchov, S. E. Belsky, F. F. Tsaruk
Belarusian State Technological University
**FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF HIGH-FREQUENCY
FATIGUE FRACTURES**

The article explores the possibility of using high-frequency cyclic loading for fatigue testing of aluminum alloy AK8M3 obtained using recycled materials. Schemes of stands for testing and a method for determining the fatigue characteristics of metallic materials are given. The coincidence of the distribution of fatigue cracks with the maximum value of cyclic stresses is established. It is shown that the use of high-frequency loading makes it possible to carry out comparative tests of structural materials with a significant acceleration of the research process and with increased reliability of the results due to a larger number of tested objects at an acceptable level of labor costs and energy savings.

The optimal value of the percentage of iron in the AK8M3 alloy under study was experimentally established in terms of the level of its fatigue properties, which can be taken within one percent, with an allowable deviation of not more than half a percent of Fe. It can be assumed that this effect of the iron impurity will remain for various types of surface treatment of this alloy. The fractographic analysis of the fractures of the samples consisted in determining and subsequently establishing the main causes of the destruction of the material. Thus, it has been established that the parameters of the laser hardening technology used in this work cannot be recommended for increasing the level of fatigue characteristics of the studied alloy.

Keywords: aluminum alloys, fatigue characteristics, fatigue tests, laser processing, fatigue cracks, fracture, structure.

For citation: Pishchov M. N., Belsky S. E., Tsaruk F. F. Fractographic analysis of high-frequency fatigue fractures. *Processing of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 2 (270), pp. 238–244. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-270-2-28 (In Russian).

Введение. В настоящее время сплавы на основе алюминия благодаря наличию хороших служебных свойств по объему производства занимают в мире второе место после сплавов на основе железа. При этом следует отметить, что получение тонны первичного алюминия требует на порядок выше энергозатрат по сравнению с получением тонны сплава на основе железа. Поэтому весьма актуальной (особенно при значительном подорожании энергоносителей в сезоне 2021/2022 г.) является задача всемерного увеличения использования вторичного алюминия, получение которого позволяет снизить энергозатраты до 20 раз по сравнению с первичным при существенно меньшей экологической нагрузке на среду обитания. Известно, что в Европейском Союзе производство вторичных алюминиевых сплавов до последнего времени росло быстрее, чем производство первичных, причем переработкой вторичного сырья занимались порядка двухсот заводов [1].

Однако по комплексу механических свойств алюминиевые сплавы, полученные с использованием металлолома, существенно уступают первичным, что связано с большим количеством вредных примесей, прежде всего железа. Наличие в структуре такого материала крупноиглочатых включений Fe₃Al существенно ухудшает усталостные характеристики сплавов.

Для расширения номенклатуры деталей машин, изготавливаемых из таких материалов, целесообразно использовать поверхностное упрочнение, в частности, лазерную обработку. В этом случае существенно повышается твердость материала, а также его сопротивление изнашиванию. Однако влияние лазерной обработки на усталостные характеристики алюминиевых сплавов почти не исследовано.

Для снижения трудоемкости и сокращения времени проведения усталостных испытаний, особенно при больших (до 10⁸ циклов) базах, весьма перспективным является использование высоких частот механических колебаний, позволяющих за приемлемый промежуток времени обеспечить наработку значительного числа циклов.

Так, для проведения испытаний на частоте 50 Гц и базе 10⁸ циклов необходимо затратить 555 ч непрерывной работы (более 23 сут) испытательной установки, а проведение этих же испытаний на частоте 20 кГц – всего 1,3 ч, т. е. в 400 раз меньше времени. Особенно эффективным является использование данного метода исследований при проведении сравнительных испытаний [2–7].

Основная часть. Объектом исследований в данной работе являлись плоские балочные образцы толщиной 2,0 мм из вторичного алюминиевого сплава АК8МЗ с различным содержанием железа и разным состоянием поверхности (таблица). Общий вид образца без лазерного воздействия с усталостным разрушением и лазерным воздействием без усталостной трещины приведены на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид образцов для усталостных испытаний

Нагружение образцов (рис. 2) производилось на специально разработанной исследовательской установке с резонансной частотой колебаний $f_{рез} = 18$ кГц.

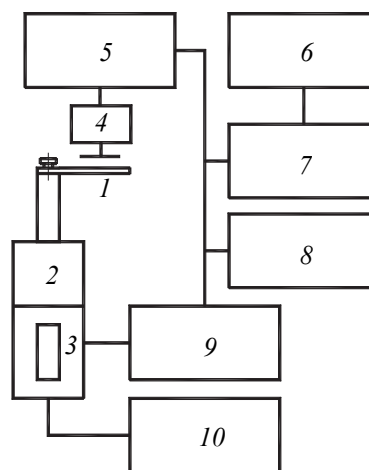


Рис. 2. Схема магнестрикционного стенда:

- 1 – образец; 2 – концентратор;
- 3 – магнестриктор; 4 – вибромметр;
- 5 – прибор стабилизации амплитуды;
- 6 – регистратор; 7 – частотомер;
- 8 – осциллограф; 9 – усилитель;
- 10 – блок подмагничивания

Источником механических колебаний в установке служит магнестрикционный преобразователь, работающий в резонансном режиме (18 кГц) для достижения приемлемого уровня циклических напряжений, достаточного для разрушения испытываемого образца. Автоматическое поддержание постоянной амплитуды колебаний образца осуществляется с помощью прибора стабилизации амплитуды ПСА, включающего в себя управляемый усилитель с использованием фазовращателя, ограничителя и фильтров, настроенных на собственные частоты колебаний преобразователей и образцов. Между преобразователями и образцами (для высоких частот) устанавливаются концентраторы с коэффициентами усиления, позволяющие достичь необходимого уровня циклических напряжений в материале образца. Измерение амплитуды колебаний образцов на второй собственной форме колебаний осуществляется с помощью виброметра и контролируется оптическим микроскопом [5].

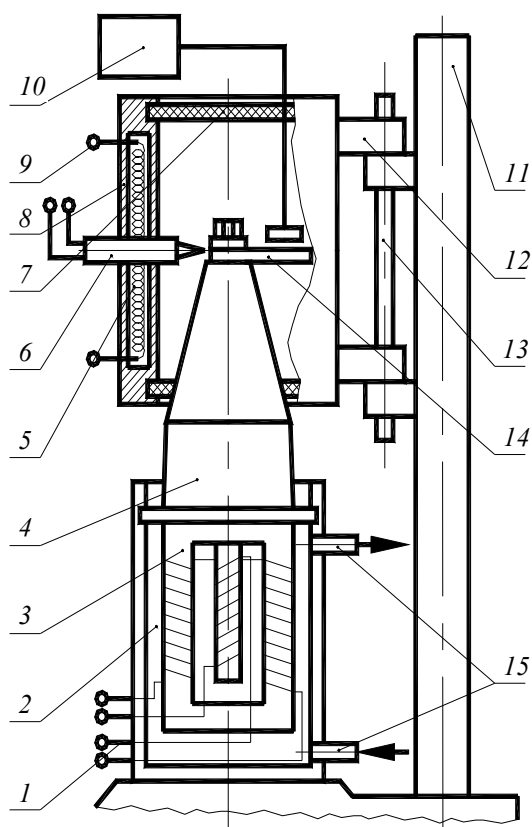


Рис. 3. Схема стенда для испытаний при повышенной температуре:

- 1 – токопроводящие провода; 2 – корпус;
- 3 – магнестриктор; 4 – концентратор;
- 5 – нагревательная спираль; 6 – термopара;
- 7 – теплоизолирующие прокладки; 8 – печь;
- 9 – контакты печи; 10 – виброметр МРТИ;
- 11 – стойка; 12 – кронштейны; 13 – ось;
- 14 – образец; 15 – патрубки

Характеристики исследуемого сплава

Маркировка сплава	Содержание Fe, %	Технология получения и состояние поверхности
11	0,40	Плавка под покровно-рафинирующим флюсом (62% NaCl, 13% KCl, 25% NaF) + модифицирование по пат. № 57584А, затем литье и термообработка по режиму Т6. Импульсная лазерная обработка на установке КВАНТ-12 с оплавлением поверхности, время импульса 4 мс, длина волны 0,6943 мкм, перекрытие пятен – 30%. Зона лазерного воздействия глубиной около 200 мкм
33	0,92	
55	1,45	

Образцы подвергались нагружению на второй собственной форме колебаний. Размеры и форма образцов были выбраны такими, что усталостное разрушение происходило в месте максимальных циклических напряжений, расположенных примерно посередине прямолинейного участка, что позволяло удобно исследовать изменение свойств материала и развитие усталостной трещины [8–10].

Усталостные кривые для сплава с различным содержанием железа и состоянием поверхности представлены на рис. 4, а–в, а фрактография усталостных изломов – на рис. 5.

В ходе проведения исследований было установлено, что лазерная обработка существенно влияет как на внешний вид поверхности исследованных вариантов сплава, делая ее более шероховатой, так и на структурные составляющие поверхностных слоев, приводя к оптически более гомогенной структуре, одновременно вызывая появление газовых включений существенной величины, по которым и проходит фронт усталостного повреждения.

Кинетику повреждения образца оценивали по падению резонансной частоты колебаний с развитием усталостной трещины. После достижения определенной величины падения частоты испытания прекращались.

Исследования полученной диаграммы распределения усталостных трещин по длине образцов позволили установить хорошее совпадение места появления усталостных трещин с местоположением максимума расчетной величины циклических напряжений для данной формы колебаний образца (рис. 6).

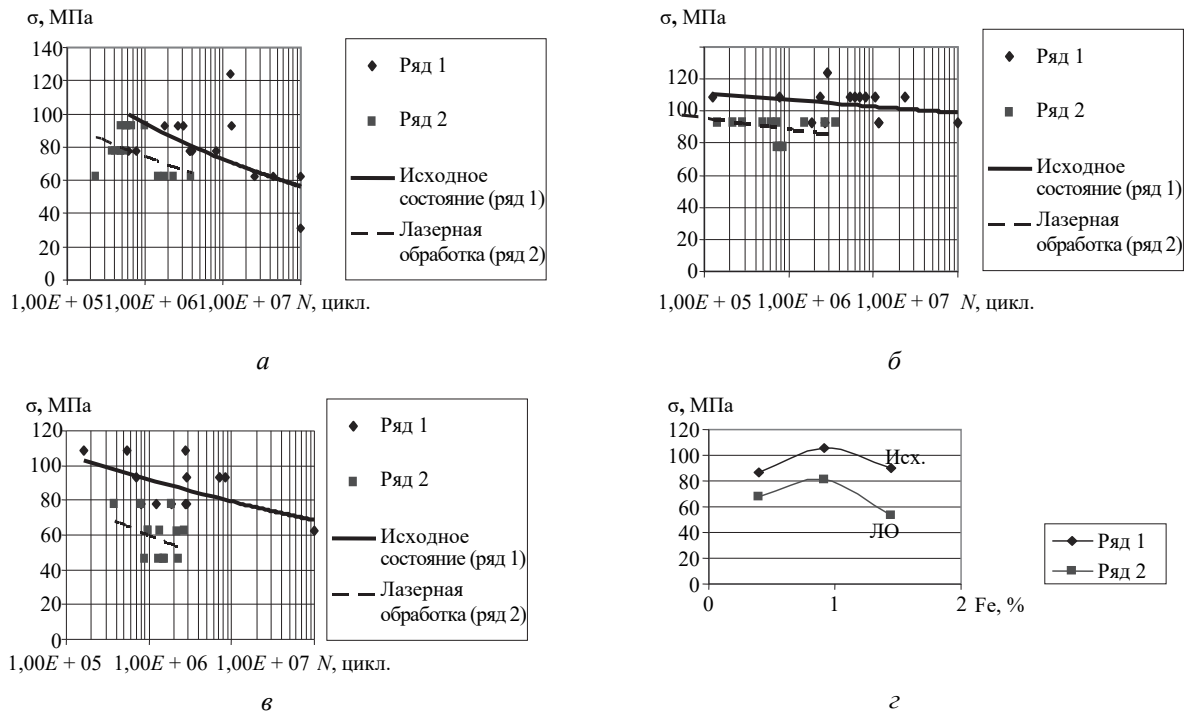


Рис. 4. Усталостные кривые для образцов с различным содержанием железа в сплаве АК8М3 (а – 0,40% Fe; б – 0,92% Fe; в – 1,45% Fe) и после лазерной обработки поверхности на ограниченный предел выносливости на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов (г): Исх. – исходное состояние; ЛО – лазерная обработка

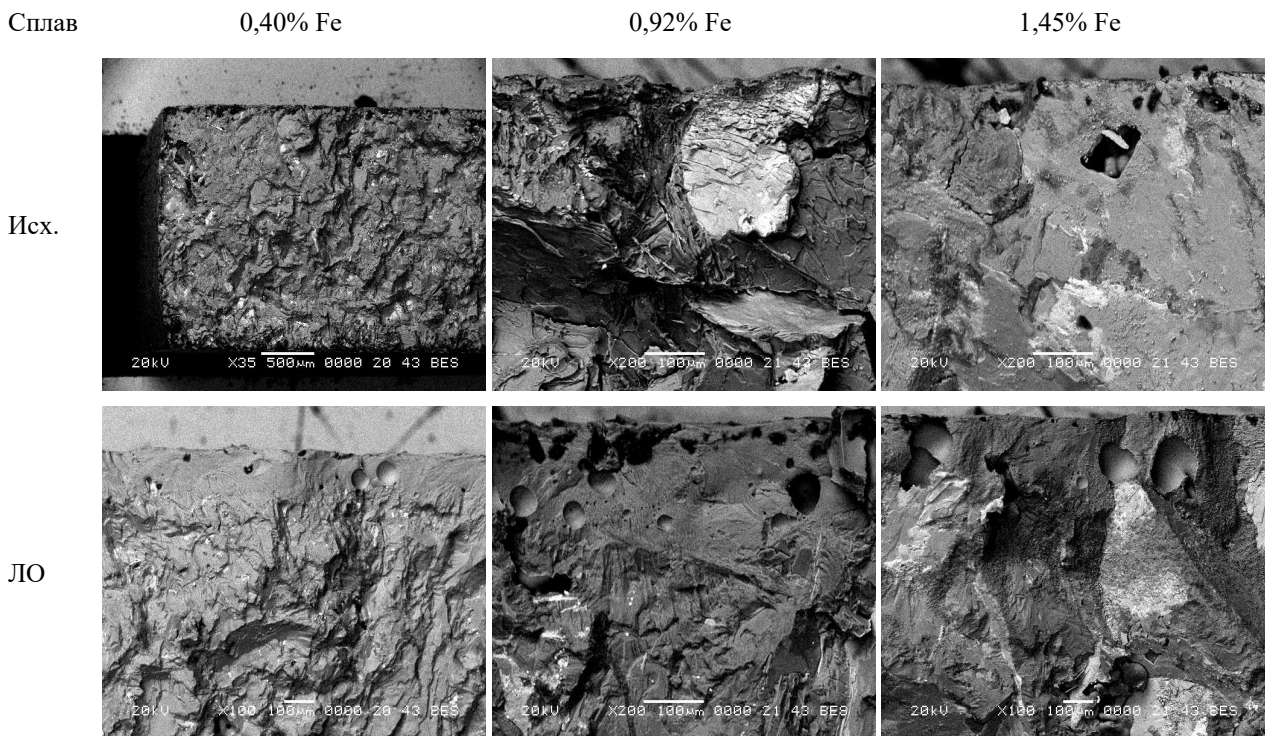


Рис. 5. Фрактография высокочастотных усталостных изломов для образцов с различным содержанием железа в сплаве АК8М3: Исх. – исходное состояние; ЛО – лазерная обработка

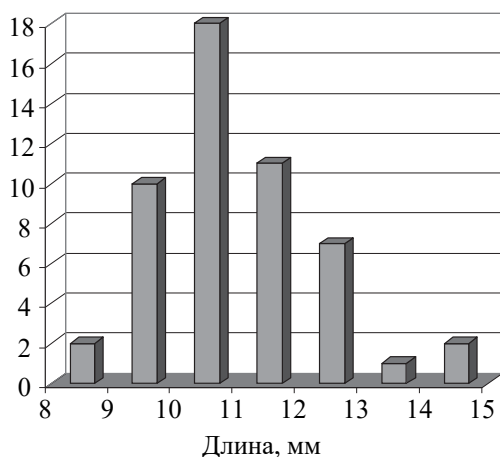


Рис. 6. Диаграмма распределения усталостных трещин по длине образцов

Как можно заметить из представленных фотографий, лазерное воздействие существенно влияет на поведение исходной литой структуры всех сплавов и приводит к значительным ее изменениям [11]. Так, наряду с увеличением гомогенности структуры, лазерная обработка приводит к появлению в зоне термического влияния газовых полостей округлой формы, через которые и проходит усталостная трещина.

Совокупность данных изменений неоднозначно влияет на поведение усталостных характеристик для всех исследованных вариантов сплава. С одной стороны, для фронта усталостной трещины слой лазерного воздействия из-за отсутствия значительных неоднородностей в объеме, способствующих увеличению концентрации слабых элементов структуры, представляет большее сопротивление ее развитию по сравнению с показателями исходной структуры. Но с другой стороны, шероховатость поверхности и газовые включения под поверхностным слоем способствуют зарождению данных трещин и, таким образом, являются факторами, существенно снижающими общие характеристики усталости. Представляется возможным, что подбором параметров лазерного воздействия на данный класс сплавов можно получать однородные структуры, которые не будут иметь дефектов в виде крупных газовых включений, благодаря чему будут

обладать повышенными характеристиками сопротивления усталости.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Использование высокочастотного нагружения позволяет проводить сравнительные испытания конструкционных материалов с существенным ускорением процесса исследований и с повышенной достоверностью результатов за счет большего количества испытанных объектов при приемлемом уровне трудозатрат и экономии энергоресурсов.

2. Экспериментально установлена оптимальная величина процентного содержания железа в исследуемом сплаве с точки зрения повышенного уровня его усталостных свойств, которую можно принять в пределах 1%, с допустимой величиной отклонения не более 0,5% Fe. Можно предположить, что такое влияние примеси железа сохранится и для других видов обработки поверхности данного сплава.

3. Установлено, что лазерная обработка существенно влияет как на внешний вид поверхности исследованных вариантов сплава, делая ее более шероховатой, так и на структурные составляющие поверхностных слоев, приводя к оптически более гомогенной структуре, одновременно вызывая появление газовых включений существенной величины, по которым и проходит фронт усталостного повреждения.

4. Таким образом, установлено, что использованные в данной работе параметры лазерной технологии упрочнения не могут быть рекомендованы для повышения уровня усталостных характеристик исследованного сплава. Для правильного выбора параметров лазерного упрочнения необходимо проведение дальнейших исследований в данном направлении.

5. Результаты данной работы являются хорошей иллюстрацией эффективного применения метода высокочастотного нагружения [2] для оперативного выявления дефектов, привносимых либо исследуемой технологией, либо нарушением традиционной упрочняющей технологии, что существенно влияет на усталостные характеристики конструкционных материалов.

Список литературы

1. Ефименко Г. Г., Михеева И. Г., Павлышин Т. Н. Сталь и альтернативные материалы. Проблемы экономики и экологии // Металл и литье Украины. 1997. № 8–9. С. 3–8.
2. Блохин А. В., Царук Ф. Ф., Гайдук Н. А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. 2002. Вып. X. С. 213–215.
3. Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. Киев: Наукова думка, 1988. 199 с.
4. Довгялло И. Г., Царук Ф. Ф., Новицкий А. В. Комплекс для усталостных испытаний металлических материалов при повышенных температурах // Современные направления развития производ-

- ственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч.- техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 1999 г. Могилев, 1999. С. 326.
5. Tsaruck F., Novitskiy A. Method of the accelerated prediction of fatigue properties of metals at normal and heightened temperatures by results of high-frequency tests // ISTF 2000: proceedings of III international symposium on tribo-fatigue. Hunan, China, 2000. P. 193–195.
6. Кузьменко В. А. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения. Киев: Наукова думка, 1979. 336 с.
7. Estimation of influence of frequency of flexural vibrations of structural sensitive characteristics of 20x13 steel / I. Dovgyallo [et al.] // Creep and Coupled Processes: the 4th International Symposium. Bialostok, 1992. P. 57–63.
8. Belsky S. E. Equipment complex for ensuring the research of the characteristics of multi-cycle fatigue using high loading frequencies // Proceeding of BSTU. Series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources. 2019. No. 2 (216). P. 201–206.
9. Анализ кинетики физико-механических характеристик при проведении усталостных испытаний инструментальной стали / С. Е. Бельский [и др.] // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 292–295.
10. Царук Ф. Ф., Бельский С. Е. Влияние содержания железа и лазерной обработки на высокочастотные усталостные свойства сплава АК8М3 // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2010. Вып. XVII. С. 323–326.
11. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design / A. Volokitin [et al.] // Metalurgiya. 2021. No. 60 (3-4). P. 325–328.

References

1. Efimenko G. G., Mikheeva I. G., Pavlyshin T. N. Steel and alternative materials. Problems of economy and ecology. *Metall i lit'ye Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 1997, no. 8–9, pp. 3–8 (In Russian).
2. Blokhin A. V., Tsaruk F. F., Gaiduk N. A. Complex of equipment for fatigue testing of elements of technological equipment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2002, issue X, pp. 213–215 (In Russian).
3. Matokhnyuk L. E. *Uskorennyye ustalostnyye ispytaniya vysokochastotnym nagruzheniyem* [Accelerated fatigue testing by high-frequency loading]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 199 p. (In Russian).
4. Dovgyallo I. G., Tsaruk F. F., Novitskiy A. V. Complex for fatigue testing of metallic materials at elevated temperatures. *Sovremennyye napravleniya razvitiya proizvodstvennykh tekhnologiy i robototekhniki: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern directions of development of production technologies and robotics: proceedings of the International. scientific and technical conference]. Mogilev, 1999, p. 326 (In Russian).
5. Tsaruck F., Novitskiy A. Method of the accelerated prediction of fatigue properties of metals at normal and heightened temperatures by results of high-frequency tests. *ISTF 2000: Proceedings of III international symposium on tribo-fatigue*. Hunan, China, pp. 193–195.
6. Kuzmenko V. A. *Ustalostnyye ispytaniya na vysokikh chastotakh nagruzheniya* [Fatigue tests at high loading frequencies]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1979. 336 p. (In Russian).
7. Dovgyallo I., Tsaruck F., Dolbin N., Dovgyallo A. Estimation of influence of frequency of flexural vibrations of structural sensitive characteristics of 20x13 steel. *Creep and Coupled Processes: the 4th International Symposium*. Bialostok, 1992, pp. 57–63.
8. Belsky S. E. Equipment complex for ensuring the research of the characteristics of multi-cycle fatigue using high loading frequencies. *Proceeding of BSTU*, series 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2019, no. 2 (216), pp. 201–206.
9. Belsky S. E., Tsaruk F. F., Pishchov M. N., Adel Rashid. Analysis of the kinetics of physical and mechanical characteristics during fatigue testing of tool steel. *Technologiya organicheskikh veshchestv: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sortudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Technology of organic substances: materials of the 87th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 292–295 (In Russian).
10. Tsaruk F. F., Belsky S. E. Effect of iron content and laser treatment on the high-frequency fatigue properties of the AK8M3 alloy. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2010, issue XVII, pp. 323–326 (In Russian).

11. Volokitin A., Volokitina I., Panin E., Naizabekov A., Lezhnev S. Strain state and microstructure evolution of AISI-316 austenitic stainless steel during high-pressure torsion (HPT) process in the new stamp design. *Metalurgiya*, 2021, no. 60 (3-4), pp. 325–328.

Информация об авторах

Пищов Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Pishchou@belstu.by

Бельский Сергей Евграфович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dmipstu@belstu.by

Царук Федор Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Tsaruk@belstu.by

Information about the authors

Pishchov Mikhail Nikolayevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Pishchou@belstu.by

Belsky Sergey Efgrafovich – PhD (Engineering), Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmipstu@belstu.by

Tsaruk Fedor Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Material Science and Engineering of Technical Systems. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Tsaruk@belstu.by

Поступила 10.03.2023