

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИЗГИБ

© Виктор Николаевич Пустовойт, Сергей Анатольевич Гришин,
Валентина Владимировна Дука*, Владислав Владимирович Федосов

Донской государственный технический университет, Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1;

*e-mail: valentina.duka.92@mail.ru

*Статья поступила 12 ноября 2019 г. Поступила после доработки 20 февраля 2020 г.
Принята к публикации 19 марта 2020 г.*

Цель работы — изучение процесса усталостного циклического разрушения стали. Изготовлена установка, предназначенная для наведения усталостных трещин, а также для изучения кинетики развития усталостной трещины, рост которой фиксировали методом разности потенциалов. Кинетику роста трещины обрабатывали с помощью компьютера, программ LGraph2 и электронных таблиц Excel. Для изучения кинетики развития усталостной трещины к краям исходного надреза исследуемого образца припаивали электроды и в процессе роста трещины регистрировали с помощью компьютера зависимость разность потенциалов — время. Для расшифровки данных эксперимента использовали тарировочный график в координатах разность потенциалов (U) — длина трещины ($L_{тр}$), построенный на основе показаний милливольтметра, в соответствии с размерами сечения образца, протекающим через него током и длиной усталостной трещины. Установлено, что рост трещины происходит ступенчато, т.е. в процессе циклического нагружения образца сначала возникает зона пластической деформации металла, а после накопления в ней напряжений определенной величины происходит их релаксация в виде возникновения трещины и скачкообразного ее роста. Далее экспериментальные данные обрабатывали, в результате чего получали график скорости роста усталостной трещины, на котором хорошо видны этапы ее скачкообразного роста. С помощью графического редактора КОМПАС строили график, который характеризует рост усталостной трещины от числа циклов усталостных испытаний на изгиб. Таким образом, с помощью созданной установки можно выращивать усталостные трещины для ударных испытаний и определять работу распространения трещины, изучать кинетику ее развития, а также проводить компьютерную обработку данных эксперимента.

Ключевые слова: усталостный циклический изгиб; кинетика развития трещины; метод электропотенциалов; методика проведения и обработки экспериментальных данных.

SETUP FOR STUDYING THE KINETICS OF CRACK GROWTH IN CYCLIC BENDING TESTS

© Victor N. Pustovoyt, Sergei A. Grishin, Valentina V. Duka*, Vladislav V. Fedosov

Don State Technical University, 1, pl. Gagarina, Rostov-on-don, 344000, Russia; *e-mail: valentina.duka.92@mail.ru

Received November 12, 2019. Revised February 20, 2020. Accepted March 19, 2020.

The goal of the study is analysis of the features of fatigue cyclic fracture of steels. An installation has been designed to induce fatigue cracks and to study the kinetics of fatigue crack development. Crack growth is recorded by the method of potential difference. The data on the crack growth kinetics were processed on a computer using LGraph2 programs and Excel spreadsheets. When studying the kinetics of the fatigue crack development, the electrodes were soldered to the edges of the initial notch of the sample and time dependence of the potential difference was recorded on a computer during crack growth. To interpret the experimental data, a calibration chart in the coordinates “potential difference (U) – the crack length (L_{cr})” constructed on the basis of the millivoltmeter readings was used, with due regard for the size of the sample section, current flow and length of the fatigue crack. Cyclic loading of the sample resulted in a stepwise character of the crack growth: first occurred zone of plastic deformation of the metal is then followed by accumulation of stresses of a certain size, their relaxation in the form of a crack and sudden crack growth. An abrupt crack growth is clearly visible on a graph of the fatigue crack growth rate obtained upon computer processing of experimental data. Using a graphical editor KOMPAS, a graph was constructed which characterized the growth of the fatigue crack against the number of cycles of fatigue tests for bending. The experimental setup provides the possibility of fatigue crack formation for impact tests, determination of

the work of crack propagation, as well as studying of the kinetics of crack development and computer processing of experimental data.

Keywords: fatigue cyclic bending; fracture kinetics; method of electric potential; experimental data processing technique.

Введение

В процессе проведения материаловедческих исследований возникает необходимость обработки экспериментальных данных в целях получения характеристик, позволяющих судить о свойствах исследуемого объекта. Поэтому с появлением новых приборов и методик возникают дополнительные возможности для исследователя. Одним из таких приборов является компьютер, который открывает данные эксперимента с помощью специальных программ [1]. К нему могут быть подключены внешние дополнительные приборы, позволяющие передавать экспериментальные данные в виде электрического сигнала, преобразуемого в цифровой формат с помощью АЦП.

Цель данной работы — исследование процесса усталостного циклического разрушения стали. Описаны оборудование, методики изучения кинетики развития усталостной трещины и обработки экспериментальных данных.

Материалы и методы исследования

Хорошо известно, что циклические нагрузки — одни из основных факторов воздействия на конструкции из металлов и их сплавов. Такие нагрузки могут вызывать усталостное разрушение отдельных узлов или целых конструкций.

Согласно [2 – 8] усталостное разрушение — это разрушение материала нагружаемого объекта до полной потери его прочности или работоспособности вследствие распространения усталостной трещины. При этом основным параметром, характеризующим усталостную выносливость того или иного материала является циклическая долговечность — число циклов напряжений или деформаций, выдерживаемое нагруженным объектом до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения.

Для исследования процесса усталостного циклического разрушения стали была собрана установка, позволяющая проводить испытания призматических образцов на циклический изгиб. Лабораторная установка предназначена для наведения усталостных трещин в образцах, а также для исследования кинетики развития усталостной трещины при циклическом нагружении. Внешний вид установки представлен на рис. 1.

В состав установки входили стенд для наведения усталостной трещины, а также оборудование для исследования и записи кинетики ее развития. Процесс возникновения и последующего развития трещины фиксировали методом электропотенциалов [9 – 12, 13, с. 63]. Блок-схема для фиксации кинетики роста трещины в реальном времени приведена на рис. 2. На образец 4, имеющий V-образный надрез, через балластное сопротивление 3 от понижающего трансформатора РНО-250-5 2 подавали переменный электрический ток промышленной частоты 50 Гц, величину которого регулировали. Для исключения влияния на результаты возможных изменений напряжения сети питание блока установки осуществляли через стабилизатор напряжения С-09 1. В результате возникновения и роста трещины у краев исходного надреза появлялась разность потенциалов, которую фиксировали при помощи милливольтметра переменного тока 5 с коэффициентом усиления, равным семи. Полученный сигнал подавался на АЦП Е-154 6, выпускаемый фирмой L-Card, который преобразовывал аналоговый сигнал в цифровой и передавал его для обработки на компьютер 7 с установленной на нем специальной программой LGraph2. Это позволяло записывать получаемый сигнал изменения падения напряжения на образце в процессе роста усталостной трещины в реальном времени.

Для проведения испытаний на циклический изгиб и наведения усталостных трещин иссле-



Рис. 1. Установка для усталостных испытаний образцов на циклический изгиб

Fig. 1. Installation for fatigue tests of samples for cyclic bending

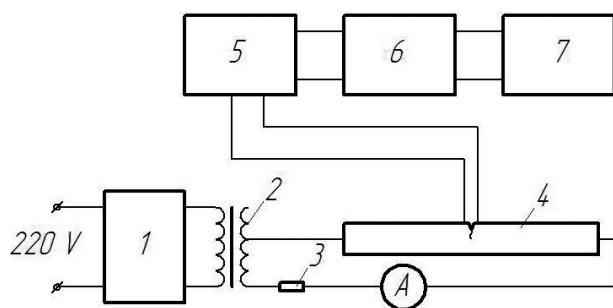


Рис. 2. Блок-схема измерения разности потенциалов

Fig. 2. The block diagram of measurement of the potential difference

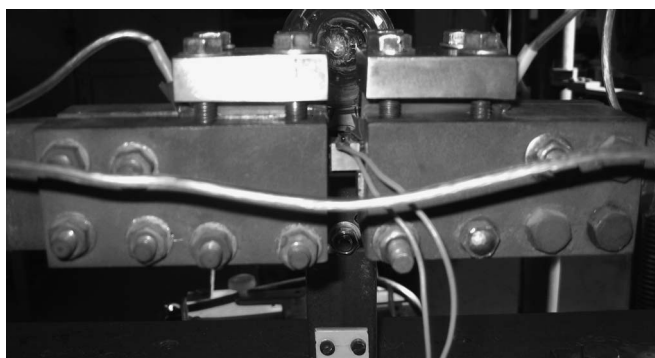


Рис. 3. Образец в зажимах стенда с подсоединенными проводами у надреза

Fig. 3. The sample in clips of the testing bench with wires connected to the notch ends

двумый образец закрепляли в специальных зажимах (рис. 3). При включении стенда с помощью эксцентрика осуществляли колебательный процесс нагружения образца с частотой, равной семи колебаний в секунду. Конструкция стенда исключала наклеп берегов трещины благодаря примененной консольной схеме нагружения образца с циклическим изгибом только в одну сторону. За счет этих колебаний через некоторое время в месте надреза возникала усталостная трещина, рост которой можно было визуально контролировать с помощью лупы Бринелля ($\times 24$).

Данная установка позволяла наводить усталостные трещины для ударных испытаний и определения работы развития трещины. Для изучения кинетики развития усталостной трещины к краям исходного надреза образца из исследуемой стали припаивали электроды. В процессе роста трещины по методике, описанной выше, регистрировали с помощью компьютера зависимость разность потенциалов — время (рис. 4). При этом образец электрически изолировали от металлической конструкции стенда.

Для расшифровки данных эксперимента использовали тарировочный график в координатах

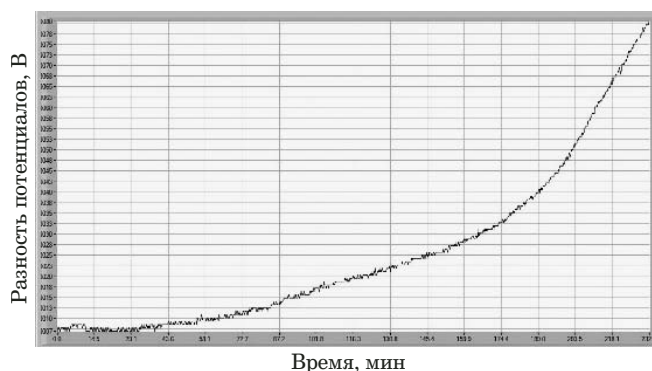


Рис. 4. График роста усталостной трещины в координатах разность потенциалов – время

Fig. 4. The time dependence of the fatigue crack growth rate

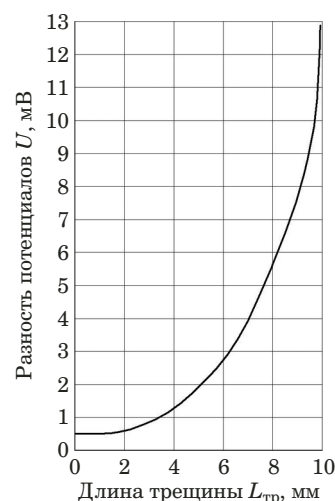


Рис. 5. Тарировочный график: сечение образца 10×10 мм; $I = 15$ А

Fig. 5. The calibration graph: section of the sample 10×10 mm; $I = 15$ A

разность потенциалов (U) — длина трещины ($L_{тр}$), приведенный на рис. 5. Он построен на основе показаний милливольтметра, в соответствии с размерами сечения образца, протекающим через него током и длиной усталостной трещины.

Обсуждение результатов

При проведении экспериментов было установлено, что рост трещины происходит ступенчато, т.е. в процессе циклического нагружения образца сначала возникает зона пластической деформации металла, а после накопления в ней напряжений определенной величины происходит их релаксация в виде возникновения трещины и скачкообразного ее роста (рис. 6). Учитывая коэффициент усиления сигнала милливольтметром, равный семи, можно говорить о чувствительности измерений, т.е. скачки на диаграмме

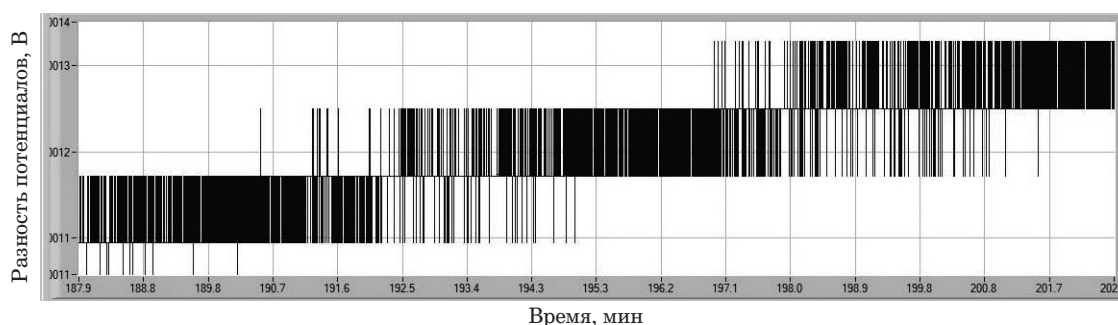


Рис. 6. Увеличенный фрагмент диаграммы кинетики развития трещины в координатах разность потенциалов – время

Fig. 6. The magnified fragment of the kinetic diagram of crack development in coordinates “potential difference – time”

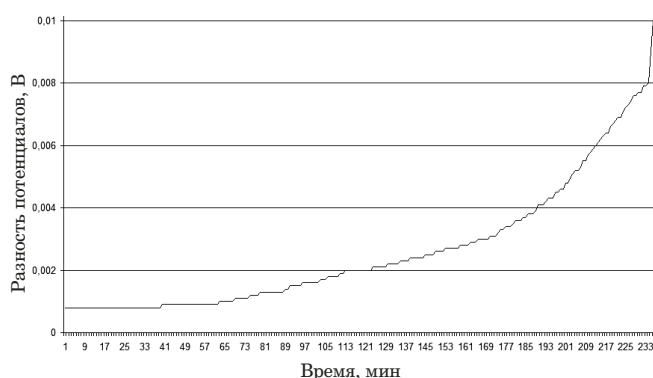


Рис. 7. Кинетика роста усталостной трещины

Fig. 7. Kinetics of the fatigue crack growth

соответствуют примерно 0,1 мВ. Всплески в положительную или отрицательную сторону относительно средней линии сигнала могли быть инициированы помехами в электрической сети, хотя и были попытки их нивелировать с помощью аппаратуры. Однако на рис. 6 виден и стабильный участок, когда трещина не развивается, т.е. идет процесс накопления в ней напряжений, которые затем релаксируют в виде прироста трещины по длине. В дальнейшем процесс повторяется снова и снова.

Таким образом, для получения информации о том, когда происходит подобный скачок разности потенциалов при росте усталостной трещины, можно воспользоваться стандартной методикой. Известно, что дифференцирование любого графика, который можно представить как график пути, дает информацию о скорости [1, 14]. Скачок роста трещины всегда означает резкое увеличение скорости ее роста. Эту информацию можно получить с помощью электронных таблиц Excel, введя данные, найденные с помощью диаграммы кинетики роста усталостной трещины, и результаты их обработки.

Проведем алгоритм получения таких данных. После завершения испытания на циклический изгиб с помощью программы LGraph2 находили

результаты, которые обрабатывали и получали файлы в текстовом формате, в графическом формате с расширением bmp, предназначенные для экспорта в программу MATLAB. В этом случае данные эксперимента экспортировали в текстовый файл. При этом учитывали, что в процессе записи экспериментальных данных АЦП производит опрос вводимого значения с частотой 10 Гц, за каждую секунду получали 10 измерений величины разности потенциалов. Поэтому для определения реальных значений проводили децимацию — выводили в текстовый файл не все точки подряд, а только выбранные. В нашем случае выбрана децимация, равная десяти. В текстовый файл выводили каждую 10-ю точку измерения. Таким образом, за одну секунду выводили величину одного измерения.

Полученный текстовый файл использовали для дальнейшей обработки с помощью электронных таблиц Excel. Для этого сначала текстовый файл переводили в текстовый редактор Microsoft Word, где проводилась замена разделяющего знака (.) на (,), который применяется в Excel. Затем эти преобразованные данные вводили в электронную таблицу Excel. На основании этих данных построили график кинетики разрушения образца при росте усталостной трещины в процессе испытаний на циклический изгиб. Пример такого графика приведен на рис. 7.

Далее обрабатывали эти экспериментальные данные с помощью графического дифференцирования по известной формуле [14], вводимой в электронную таблицу Excel. В результате получали график скорости роста усталостной трещины, на котором хорошо видны этапы ее скачкообразного роста (рис. 8). В данном случае график построен в координатах скорость роста трещины (В/мин) – время (мин), поскольку для его построения были взяты значения разности потенциалов из экспериментального графика кинетики роста усталостной трещины, приведенного на рис. 7.

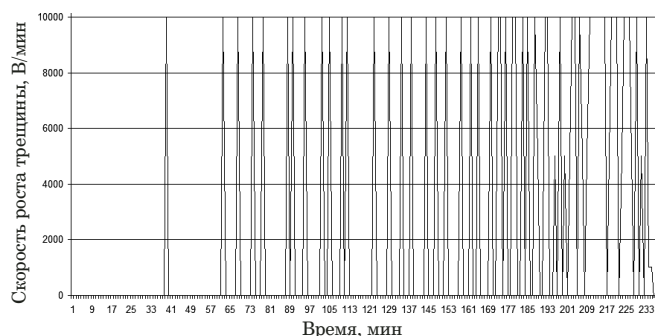


Рис. 8. Скорость роста трещины

Fig. 8. Crack growth rate

Однако более значимой является зависимость величины роста усталостной трещины от числа циклов знакопеременного изгиба [15]. Для ее построения использовали полученные в процессе испытаний текстовые данные и результаты их преобразования в длину усталостной трещины с помощью тарировочного графика, приведенного на рис. 5. Для получения таких данных использовали методику, применяемую в компьютерной графике при разработке технических чертежей с помощью графического редактора КОМПАС, разработанного фирмой АСКОН. В этом случае точность данных о длине усталостной трещины в процессе ее роста значительно повышалась. На основании таких преобразований в конечном итоге получали зависимость роста усталостной трещины от числа циклов усталостных испытаний на изгиб (рис. 9).

Заключение

Таким образом, с помощью созданной установки можно выращивать усталостные трещины для ударных испытаний и определения работы распространения трещины, а также изучать кинетику развития трещины и проводить компьютерную обработку данных эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин С. А., Бурунова Т. Н. Применение ЭВМ, элементов математического анализа и средств машинной графики при исследовании динамических характеристик машин и механизмов / Вестник ДГТУ. Сер. Вопросы машиноведения и конструирования машин. 1999. Т. 2. № 4. С. 98 – 100.
2. Волегов П. С., Грибов Д. С., Трусков П. В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ / Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 3. С. 11 – 24.
3. Leguillon D., Yosibash Z. Failure initiation at V-notch tips in quasi-brittle materials/ International Journal of Solids and Structures. 2017. Vol. 29. May. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.j-solstr.2017.05.036.
4. Kamaya M. Lou-cycle fatigue crack growth prediction by strain intensity factor / Int. J. Fatigue. 2015. Vol. 72. P. 80 – 89.

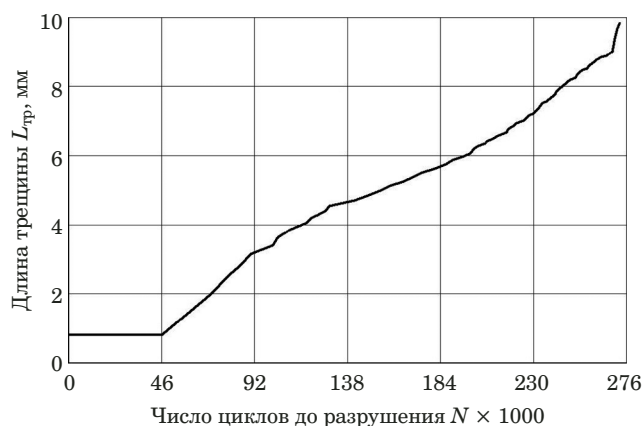


Рис. 9. Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов усталостных испытаний

Fig. 9. The dependence of the fatigue crack length on the number of fatigue test cycles

5. Веретимус Н. К., Веретимус Д. К. Влияние накопленных повреждений на расчетную скорость малоциклового трещины / Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 11(47). С. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-11-1425.
6. Сапожников С. Б., Иванов М. А., Ярославцев С. И., Щербаков И. А. Напряженно-деформированное состояние и разрушение элементов конструкций с острыми концентраторами напряжений при изгибе / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 4. С. 40 – 55. DOI: 10.15593/per.mech/2017.4.04
7. Потемкин А. Н., Викулов А. С., Никитин Д. Е. Усталостное разрушение материалов с позиции различных теорий / Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 13. С. 3311 – 3315. <http://e-koncept.ru/2015/85663.htm>
8. Маркочев В. М., Гольцев В. Ю., Бобринский А. П. Упрощенная схема измерения длины трещины в образцах из листовых материалов методом электрического потенциала / Заводская лаборатория. 1971. Т. 37. № 5. С. 598 – 600.
9. Маркочев В. М., Житенев В. В., Бобринский А. П. Измерение скорости роста закритических трещин методом разности электрических потенциалов / Заводская лаборатория. 1976. Т. 42. № 2. С. 221 – 224.
10. Лебедев Г. Д., Воробьев Н. А. К определению длины трещины методом разности электрических потенциалов при циклическом нагружении образца с односторонним сквозным боковым надрезом / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. Т. 70. № 11. С. 42 – 44.
11. Шкатов П. Н., Малиновский А. К., Мякушев К. В. Измерение глубины трещин электропотенциальным методом с учетом нескольких параметров, влияющих на регистрируемые напряжения / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 4(306). С. 133 – 138.
12. Гришин С. А. Повышение конструкционной прочности сталей термической обработкой в магнитном поле. — Ростов-на-Дону: ИВТ им. Г. Я. Седова, 2015. — 81 с.
13. Пустовойт В. Н., Гришин С. А., Зайцева М. В. Методика применения средств компьютерной графики для исследования течения нестационарных процессов в современном материаловедении / Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11. № 5(56). С. 676 – 682.
14. Пустовойт В. Н., Дука В. В., Долгачев Ю. В., Арефьева Л. П., Федосов В. В., Салынских В. М. Особенности разрушения феррито-мартенситного композита / ДГТУ. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 226. N 03006. P. 1 – 5. DOI: 10.1051/mateconf/201822603006

REFERENCES

1. **Grishin S. A., Burunova T. N.** The use of computers, elements of mathematical analysis and computer graphics in the study of the dynamic characteristics of machines and mechanisms / Vestn. DGTU. Ser. Vopr. Mashinoved. Konstr. Mash. 1999. Vol. 2. N 4. P. 98 – 100 [in Russian].
2. **Volegov P. S., Gribov D. S., Trusov P. V.** Damage and fracture: review of experimental studies / Fiz. Mezomekh. 2015. Vol. 18. N 3. P. 11 – 24 [in Russian].
3. **Leguillon D., Yosibash Z.** Failure initiation at V-notch tips in quasi-brittle materials/ International Journal of Solids and Structures. 2017. Vol. 29. May. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.05.036.
4. **Kamaya M.** Low-cycle fatigue crack growth prediction by strain intensity factor / Int. J. Fatigue. 2015. Vol. 72. P. 80 – 89.
5. **Veretimys H. K., Veretimys D. K.** Effect of the cumulative damage on the designed rate of the low-cycle crack / Inzh. Zh. Nauka Innov. 2015. Vol. 11(47). P. 11. DOI: 10.18698/2308-6033-2015-11-1425 [in Russian].
6. **Sapozhnikov S. B., Ivanov M. A., Yaroslavl'tsev S. I., Shcherbakov I. A.** The Stress-strain state and failure of structural elements with sharp stress concentrators under bending / Vestn. PNRPU. Mekhanika. 2017. N 4. P. 40 – 55. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.04 [in Russian].
7. **Potemkin A. N., Vikylov A. S., Nikitin D. E.** Fatigue failure of materials from a position of various theories / Nauch-Met. Élektron. Zh. "Kontsept". 2015. Vol. 13. P. 3311 – 3315 [in Russian].
8. **Markochev V. M., Goltsev V. Yu., Bobrinsky A. P.** Simplified scheme for measuring the length of cracks in samples of sheet materials by the electric potential method / Zavod. Lab. 1971. Vol. 37. N 5. P. 598 – 600 [in Russian].
9. **Markochev V. M., Zhitenev V. V., Bobrinsky A. P.** Measurement of growth rate zakriticheskikh of cracks by method of a difference of electric potentials / Zavod. Lab. 1976. N 2. P. 221 – 224 [in Russian].
10. **Lebedev G. D., Vorobev N. A.** On the determination of crack length by the method of electric potential difference under cyclic loading of a sample with a unilateral through lateral notch / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2004. Vol. 70. N 11. P. 42 – 44 [in Russian].
11. **Shkatov P. N., Malinovskii A. K., Makuchev K. V.** Depth measurement cracks electric potential method taking into account several parameters that affect the recorded voltage / Fund. Prikl. Probl. Tekhn. Tekhnol. 2014. N 4(306). P. 133 – 138 [in Russian].
12. **Grishin S. A.** Increasing the structural strength of steels by heat treatment in a magnetic field. — Rostov-on-Don: IVT im. G. Ya. Sedova, 2015. — 81 p. [in Russian].
13. **Pustovoi V. N., Grishin S. A., Zaitseva M. V.** Application technique of computer graphics for nonsteady processes research in modern material science / Vestn. DGTU. 2011. Vol. 11. N 5(56). P. 676 – 682 [in Russian].
14. **Pustovoi V. N., Duka V. V., Dolgachev Yu. V., Aref'eva L. P., Fedosov V. V., Salynskikh V. M.** Features of destruction of a ferrite-martensitic composite / DGTU. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 226. N 03006. P. 1 – 5. DOI: 10.1051/mateconf/201822603006 [in Russian].