



Оригинальная статья

УДК 669.017.16:539.384

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-92-97



УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОГО КОМПОЗИТА

В. Н. Пустовойт, С. А. Гришин, Ю. В. Долгачев, В. В. Дука

Донской государственный технический университет (Россия, 344002, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

Аннотация. Приведены результаты усталостных испытаний естественного стального композитного материала на циклический изгиб по отнулевому циклу нагружения. Естественный феррито-мартенситный композит (ЕФМК) имеет структуру из чередующихся слоев вязкого феррита и прочного мартенсита, что обуславливает особый механизм торможения трещины при нагружении. Отнулевой цикл нагружения предполагает наличие растягивающих усилий, направленных только в одну сторону, что позволяет избежать наклепа берегов трещины при ее росте. С помощью полученных данных о кинетике развития усталостной трещины и скорости ее роста в зависимости от числа циклов колебаний построена диаграмма усталостного разрушения. Проведено сравнение результатов испытаний образцов из стали одного химического состава. В одном случае была проведена традиционная термическая обработка на структуру сорбита отпуска. В другом – закалкой исходной строчечной феррито-перлитной структуры из межкритического интервала температур получена слоистая структура феррито-мартенситного композита. Эти материалы имели одинаковую твердость, но различие в структурной организации обусловило преимущество стали со структурой ЕФМК в отношении сопротивления разрушению при циклическом нагружении. При подходе трещины к поверхности раздела мартенсит-феррит возникает расслоение в феррите из-за растягивающих напряжений, параллельных плоскости трещины. Остановка роста трещины происходит до подведения дополнительной энергии для образования новой трещины в условиях, близких к одноосному напряженному состоянию. Представлена методика определения характеристик кинетики роста трещин при усталостном нагружении, которая рекомендована при испытании сталей и сплавов в условиях циклического изменения нагрузок.

Ключевые слова: композит, сталь, расслоение, отнулевое нагружение, феррит, мартенсит, разрушение, трещина

Для цитирования: Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Долгачев Ю.В., Дука В.В. Усталостное разрушение стали со структурой феррито-мартенситного композита // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 92–97. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-92-97>

Original article

FATIGUE FRACTURE OF STEEL WITH FERRITE-MARTENSITE COMPOSITE STRUCTURE

V. N. Pustovoyt, S. A. Grishin, Yu. V. Dolgachev, V. V. Duka

Don State Technical University (1 Gagarina Sqr., Rostov-on-Don 344002, Russian Federation)

Abstract. The article presents results of the fatigue tests of natural steel composite material for cyclic bending in a zero loading cycle. Natural ferrite-martensite composite (NFMC) has a structure of alternating layers of viscous ferrite and strong martensite, which determines special mechanism of crack deceleration under loading. Zero loading cycle presumes presence of tensile forces directed only in one side, which makes it possible to avoid work hardening of crack edges during its growth. A diagram of fatigue fracture was constructed using data obtained on kinetics of fatigue crack propagation and its growth rate, depending on the number of vibration cycles. Comparison of test results for the samples made of steel of the same chemical composition was carried out. In one case, the secondary sorbite structure ran through the traditional heat treatment. In the other, quenching of the initial row ferrite-pearlite structure in intercritical temperature range, led to obtaining ferrite-martensite composite layered structure. These materials had the same hardness, but the difference in structure organization caused the NFMC structure steel advantage in terms of resistance to fracture under cyclic loading. When crack approaches the martensite-ferrite interface, delamination occurs in ferrite due to tensile stresses parallel to the crack plane. Growth of a crack stops before additional energy is supplied for a new crack generation under conditions close to the uniaxial stress state. Method for determining characteristics of kinetics of crack growth under fatigue loading is presented and recommended for testing steels and alloys under conditions of cyclic load changes.

Keywords: composite, steel, delamination, zero loading, ferrite, martensite, fracture, crack

For citation: Pustovoyt V.N., Grishin S.A., Dolgachev Yu.V., Duka V.V. Fatigue fracture of steel with ferrite-martensite composite structure. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 92–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-92-97>

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] обоснована возможность создания стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК) на основе использования доэвтектоидных сталей со строчечной феррито-перлитной структурой. Закалка такой стали из межкритического интервала температуры ($A_1 - A_3$) дает возможность получить слоистую структуру феррито-мартенситного композита (рис. 1).

Исследование свойств рассматриваемых сталей при статическом растяжении и ударном изгибе [2 – 6] дает основание полагать, что для такой структуры характерным является особый механизм торможения развития трещины. Целью настоящей работы является получение сведений о развитии разрушения при усталостном нагружении сталей со структурой феррито-мартенситного композита.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проводили усталостные испытания призматических образцов на циклический изгиб [7 – 9] с целью изучения кинетики развития усталостной трещины, скорости ее роста в зависимости от количества циклов колебаний и на основании этих данных построены диаграммы усталостного разрушения. Образцы размером

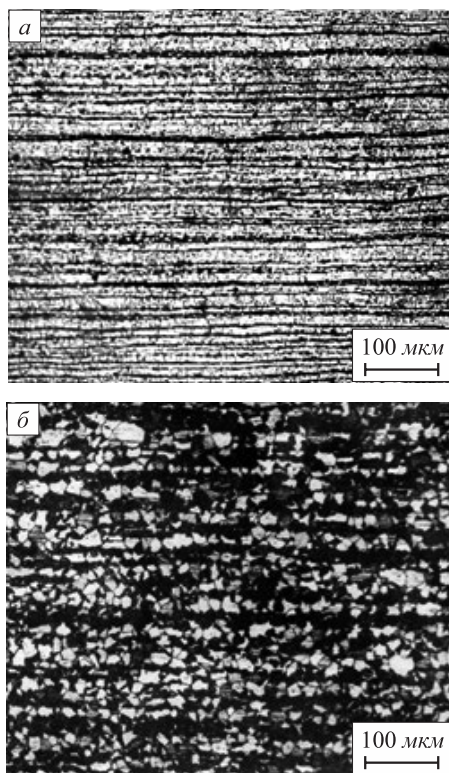


Рис. 1. Строчечная феррито-перлитная структура (а) и структура после закалки с температуры 760 °С (б) стали марки 14Г2

Fig. 1. Linage ferrite-pearlite structure (a) and structure after quenching of 14G2 steel from temperature of 760 °C (b)

10×10×100 мм испытывали на циклический изгиб по отнулевому циклу нагружения [10], то есть применяли схему изгиба, при которой изгибающий момент приводил только к растягивающим напряжениям в слоях феррита и мартенсита, а сжимающие напряжения были равны нулю. Это достигали настройкой вибростенда: растягивающее образец усилие было направлено только в одну сторону (рис. 2). Такая схема исключает возможность наклепа берегов трещины при ее росте. Размерные параметры вибрационного стенда и образцов имели постоянные значения ($a = 10$ мм, $b = 10$ мм, $L = 540$ мм, $L_{тр} = 160$ мм). Амплитуда A колебаний составляла 5 мм. Исходя из этого, рассчитывали параметры, необходимые для определения напряжения в месте развития трещины, по методике из работы [11]. Усилие $P = \frac{3EJA}{L^3}$ (где $J = \frac{ab^3}{12}$ – момент инерции; E – модуль упругости). В процессе испытаний величина b с учетом надреза (1,25 мм) и роста трещины будет уменьшаться, соответственно будет меняться и момент инерции. Начальная величина $b = 8,75$ мм и $P = 10,7$ Н, а изгибающий момент в месте развития трещины $M = P(L - L_{тр}) = 4,07$ Н·м и напряжение $\sigma = \frac{M}{W}$ (где $W = \frac{ab^2}{6}$ – момент сопротивления для прямоугольного сечения).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс развития трещины фиксировали методом электропотенциалов [8 – 10] в координатах разность потенциалов – время. Эту зависимость расшифровывали по тарировочному графику для построения кривых длина трещины – число циклов нагружения (рис. 3). Эти зависимости иллюстрируют существенно разный характер роста трещины в стали после закалки и отпуска (кривая 1) и в стали со структурой ЕФМК (кривая 2). Видно, что в стали со структурой ЕФМК трещина «стартует» раньше. Это не является правилом и обусловлено тем, на какой структурной составляющей ЕФМК располагается дно надреза: если на хрупкой

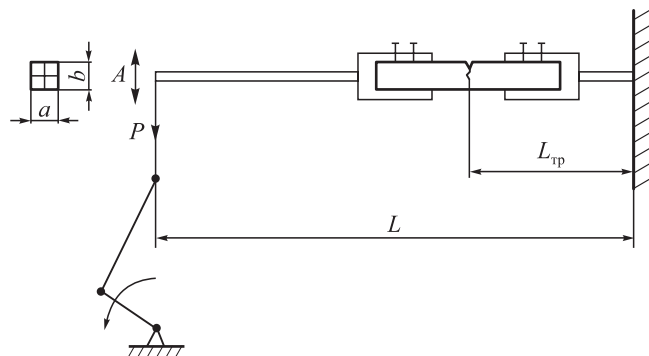


Рис. 2. Схема нагружения призматического образца при циклическом испытании на изгиб

Fig. 2. Scheme of prismatic sample loading at cyclic bending test

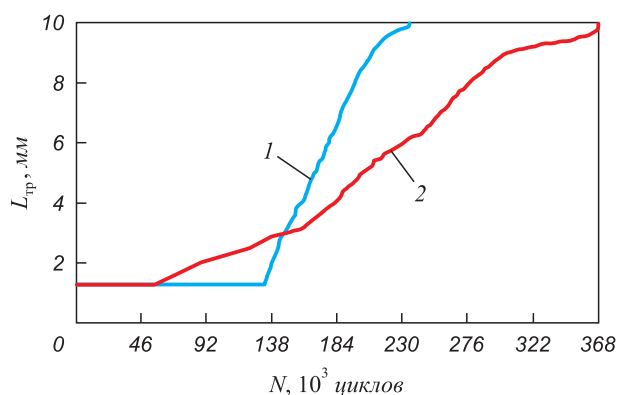


Рис. 3. Зависимость длины трещины от числа циклов нагружения в стали марки 14Г2:

1 – полная закалка и отпуск (HRC 46); 2 – закалка из межкритического интервала температур (730 °C) на структуру ЕФМК (HRC 46)

Fig. 3. Dependence of crack length on the number of loading cycles in 14G2 steel:

1 – total quenching and tempering (HRC 46); 2 – quenching from the intercritical range of temperature (730 °C) to NFMK structure (HRC 46)

мартенситной пластине, то трещина «стартует» раньше; если дно надреза расположено на вязкой ферритной пластине, то трещина может начинать движение также, как у образца со структурой троостита отпуска.

Главное различие выражается в разной скорости роста трещины и существенно большим числом циклов до разрушения в стали с композитной структурой. Такая ситуация обусловлена особым механизмом движения трещины в стали, структура которой организована в виде параллельных слоев пластичного, вязкого феррита и прочного мартенсита. В образце с исходным надрезом, заканчивающимся в одном слое (по типу «торможения трещины» [11]), при подходе трещины к поверхности раздела мартенсит – феррит на ней (или около нее) возникает расслоение в феррите вследствие наличия растягивающих напряжений, параллельных плоскости трещины [12 – 16]. В этом случае часть подводимой извне энергии расходуется на образование

поверхности расслоения в феррите. Выход трещины в расслоение приводит к изменению ее траектории, остановке продвижения и релаксации растягивающих напряжений в ее вершине. Для разрушения следующего слоя композита (мартенситного слоя) в нем должна образоваться новая трещина, но уже в условиях, близких к одноосному напряженному состоянию, на что потребуется дополнительная энергия. На рис. 4 приведены иллюстрации, показывающие возникновение расслоений в композитах.

В работе [13] условие возникновения расслоения записано в следующем виде:

$$\sigma \geq \frac{K_D}{\varphi \sqrt{c}}, \quad (1)$$

где K_D – некоторое критическое значение коэффициента интенсивности напряжений; $\varphi = \frac{3+\nu}{1+\nu}$ – константа; ν – коэффициент Пуассона; c – толщина хрупкого слоя (мартенсита).

При этом показано, что для возникновения расслоения впереди мартенситной трещины (до разрушения следующего хрупкого слоя) необходимо, чтобы $\sigma_p < \sigma < \sigma_{0,2}$ и, следовательно, условие возникновения расслоения, тормозящее разрушение слоистого образца, имеет вид

$$K_D \leq \varphi \sqrt{\frac{E \sigma_{0,2} h \nu}{\alpha \beta}}, \quad (2)$$

где h – толщина пластичного слоя (феррита); ν – максимальная величина смещения в пластичном слое; $\alpha = \frac{1+\nu}{3-\nu}$ и $\beta = \frac{4}{3-\nu}$ – константы.

Величина $K_D \sim \sqrt{\gamma_s n_s^2}$, тогда условие (2) примет следующий вид:

$$\sqrt{\gamma_s n_s^2} < \theta \sqrt{a \nu}, \quad (3)$$

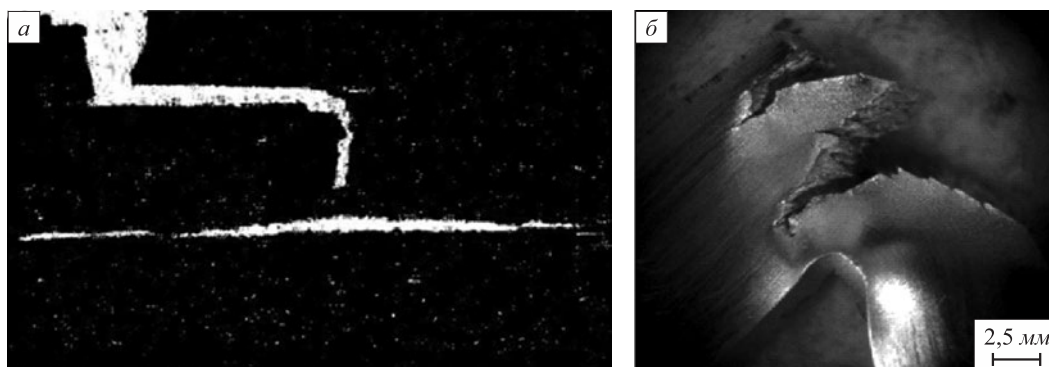


Рис. 4. Расслоение в композите медь-кремнеземное волокно (а) [12]; неразрушенный при ударном изгибе образец стали марки 14Г2 со структурой ЕФМК с расслоениями в феррите (б) [2]

Fig. 4. Delamination in the copper-silica fiber composite (a) [12]; sample of 14G2 steel not destroyed by impact bending with NFMK structure and delamination in ferrite (b) [2]

где γ_s – предельная деформация сдвига в ферритной пластине; n_s – показатель упрочнения при сдвиге;

$$\theta = \varphi \sqrt{\frac{E}{\alpha\beta}} - \text{константа.}$$

Если толщина пластичного слоя феррита в многослойном образце достаточна для выполнения условия (3), то образуется расслоение, препятствующее дальнейшему продвижению магистральной трещины. Для стали марки 14Г2 при значениях γ_s примерно 1000 МПа и $n_s = 0,43$ расслоение возникает при соотношении $\frac{h}{c} \geq 3$. Такое соотношение имеет место при закалке стали марки 14Г2 с температуры 730 – 740 °С межкритического интервала [17, 18].

Диаграммы разрушения и кинетические характеристики, получаемые при циклическом нагружении (рис. 3), зависят от уровня напряжений, от частоты и асимметрии цикла, а также от геометрии образца. Вместе с тем, долговечность образца практически определяется скоростью роста макротрещины, которая является функцией силы, движущей трещину, или коэффициента интенсивности напряжений K в ее вершине. В работах [19 – 23] показано, что зависимость скорости роста усталостной трещины от интенсивности напряжений лучше описывается уравнением П. Париса, связывающим скорость роста с изменением коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины текущей длины в пределах цикла $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$. Такая зависимость показана на рис. 5, построенном с использованием данных на рис. 3 и определением величины $K = \sigma\sqrt{\pi l}$ (где σ – номинальное напряжение в сечении образца, изменяющееся при росте трещины; l – длина трещины). Величина σ определяется разностью между максимальным и минимальным значениями напряжений, возникающих в образце в процессе циклических испытаний на изгиб. В настоящей работе применяли отнулевой цикл нагружения, при котором минимальное напряжение равно нулю, в связи с чем в сечении образца при росте трещины возникали только положительные растягивающие напряжения, которые использовали для определения величины K ($K_{\min} = 0$).

Зависимость длина трещины – число циклов пропорциональна только для заданного напряжения цикла, при изменении которого может изменяться поведение материалов, в то время как зависимость $\frac{dl}{dN}$ от ΔK является универсальной с точки зрения ее применения при различных напряжениях цикла и константы, входящих в уравнение, связывающее $\frac{dl}{dN}$ и ΔK , и может быть использована в качестве характеристики материалов [24]. В уравнении П. Париса $\frac{dl}{dN} = CK^n$ величины n и C являются важными сравнительными параметрами материала, позволяющими оценить его поведение в широ-

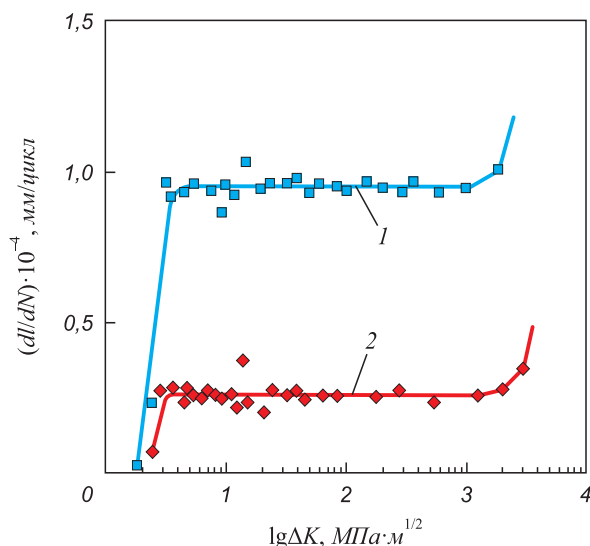


Рис. 5. Зависимость скорости роста усталостной трещины от изменения коэффициента интенсивности напряжений для стали марки 14Г2:

1 – полная закалка и отпуск; 2 – закалка из межкритического интервала температур (ЕФМК)

Fig. 5. Dependence of the fatigue crack growth rate on change in stress intensity factor for 14G2 steel:

1 – total quenching and tempering; 2 – quenching from the intercritical range of temperature (NFMK)

ком диапазоне длин трещин и действующих напряжений [25 – 30]. В частности, величина n равна тангенсу угла наклона прямой $\frac{dl}{dN} - \ln \Delta K$ к оси $\ln \Delta K$. Чем меньше величина n , тем меньше чувствительность материала к повышению напряжений (к перегрузкам). У стали со структурой ЕФМК величина n существенно ниже ($n = 2,14$), чем у той же стали со структурой сорбита отпуска ($n = 8,14$). Это обусловлено остановками роста трещины из-за расслоений. Величина C определяется значением скорости роста трещины при $\Delta K = 0,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ($1 \text{ кгс/мм}^{3/2}$). Чем меньше значение C , тем относительно выше способность материала тормозить разрушение при любом уровне напряжений.

Выводы

Приведенные результаты исследования доказывают преимущества стали со структурой слоистого естественного феррито-мартенситного композита в отношении сопротивления разрушению при циклическом нагружении по сравнению со сталью того же состава после традиционной термической обработки на структуру сорбит отпуска. Предложенная методика определения характеристик кинетики роста трещин при усталостном нагружении может быть рекомендована для проведения исследований условий разрушения сталей и сплавов при циклическом изменении нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Пат. 2495141 РФ. МПК C21D8/800, C21D8/02. Способ получения естественного феррито-мартенситного композита / В.Н. Пустовойт, Ю.М. Домбровский, А.В. Желева, М.В. Зайцева. Заявл. 11.05.2012; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28.
2. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V., Dombrovskii Yu.M., Duka V.V. Structural organization and properties of a natural ferrite-martensite steel composite // *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62. No. 5-6. P. 369–375. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00570-9>
3. Cadoni E., Singh N.K., Forni D., Singha M.K., Gupta N.K. Strain rate effects on the mechanical behavior of two Dual Phase steels in tension // *European Physical Journal: Special Topics*. 2016. Vol. 225. No. 2. P. 409–421. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-02638-3>
4. Luo M., Wierzbicki T. Numerical failure analysis of a stretch-bending test on dual-phase steel sheets using a phenomenological fracture model // *International Journal of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47. No. 22-23. P. 3084–3102. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.07.010>
5. Kim J.H., Sung J.H., Piao K., Wagoner R.H. The shear fracture of dual-phase steel // *International Journal of Plasticity*. 2011. Vol. 27. No. 10. P. 1658–1676. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.02.009>
6. Dykeman J., Hoydick D., Link T., Mitsuji H. Material property and formability characterization of various types of high strength dual phase steel // *SAE Technical Paper*. 2009. Vol. 1. P. 794–804. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0794>
7. Soboyejo W. *Mechanical Properties of Engineered Materials*. N.Y.: CRC Press, 2002. 608 p.
8. Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Дука В.В., Федосов В.В. Установка для исследования кинетики развития трещины при испытаниях на циклический изгиб // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 7. С. 59–64. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>
9. Pustovoit V.N., Grishin S.A. Special features of fracture of carbon steel with a structure of laminar ferrite-carbide mixture // *Metal Science and Heat Treatment*. 1987. Vol. 29. No. 3-4. P. 262–266.
10. Nicholas T. *High Cycle Fatigue: a Mechanics of Materials Perspective*. Elsevier, 2006. 656 p.
11. Микляев П.Г., Нешпор Г.С., Кудряшов В.Г. *Кинетика разрушения*. М.: Металлургия, 1979. 279 с.
12. Cooper G.A., Kelly A. Tensile properties of fibre-reinforced metals: fracture mechanics // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1967. Vol. 15. No. 4. P. 279–297. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(67\)90017-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(67)90017-8)
13. Greif R., Sanders J.L. The effect of a stringer on the stress in a cracked sheet // *Journal of Applied Mechanics*. 1965. Vol. 32. No. 1. P. 59–66. <https://doi.org/10.1115/1.3625784>
14. Bloom J.M., Sanders J.L. The effect of a riveted stringer on the stress in a cracked sheet // *Journal of Applied Mechanics*. 1966. Vol. 33. No. 3. P. 561–570. <https://doi.org/10.1115/1.3625122>
15. Sanders J.L. Effect of a stringer on the stress concentration due to a crack in a thin sheet // *National Advisory Committee for Aeronautics*. 1959. No. 4207. P. 10.
16. Poe J.C.C. *Stress Intensity Factor for a Cracked Sheet with Riveted and Uniformly Spaced Stringers*. Washington: NASA Technical Report, TR R – 358, 1971. 62 p.
17. Пустовойт В.Н., Дука В.В., Долгачев Ю.В. Сценарий роста трещины в стали со структурой ферритно-мартенситного композита // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2017. № 10 (205). С. 118–121.
18. Pustovoit V.N., Duka V.V., Dolgachev Y.V., Aref'eva L.P., Fedosov V.V., Salynskih V.M. Features of destruction of a ferrite-martensitic composite // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 226. Article 03006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822603006>
19. Irwin G.R., Paris P.C. *Fundamental aspects of crack growth and fracture*. In: *Engineering Fundamentals and Environmental Effects*. N.Y.: Academic Press, 1971. P. 1–46.
20. Pugno N., Ciavarella M., Cornetti P., Carpinteri A. A generalized Paris' law for fatigue crack growth // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006. Vol. 54. No. 7. P. 1333–1349. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.01.007>
1. Pustovoit V.N., Dombrovskii Yu.M., Zheleva A.V., Zaitseva M.V. *Method of natural ferrite-martensite composite obtaining*. Patent RF 2495141. MPK S21D8/800, S21D8/02. *Bulleten' izobretenii*. 2013, no. 28. (In Russ.).
2. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V., Dombrovskii Yu.M., Duka V.V. Structural organization and properties of a natural ferrite-martensite steel composite. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020, vol. 62, no. 5-6, pp. 369–375. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00570-9>
3. Cadoni E., Singh N.K., Forni D., Singha M.K., Gupta N.K. Strain rate effects on the mechanical behavior of two Dual Phase steels in tension. *European Physical Journal: Special Topics*. 2016, vol. 225, no. 2, pp. 409–421. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-02638-3>
4. Luo M., Wierzbicki T. Numerical failure analysis of a stretch-bending test on dual-phase steel sheets using a phenomenological fracture model. *International Journal of Solids and Structures*. 2010, vol. 47, no. 22-23, pp. 3084–3102. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.07.010>
5. Kim J.H., Sung J.H., Piao K., Wagoner R.H. The shear fracture of dual-phase steel. *International Journal of Plasticity*. 2011, vol. 27, no. 10, pp. 1658–1676. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.02.009>
6. Dykeman J., Hoydick D., Link T., Mitsuji H. Material property and formability characterization of various types of high strength dual phase steel. *SAE Technical Paper*. 2009, vol. 1, pp. 794–804. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0794>
7. Soboyejo W. *Mechanical Properties of Engineered Materials*. N.Y.: CRC Press, 2002, 608 p.
8. Pustovoit V.N., Grishin S.A., Duka V.V., Fedosov V.V. Setup for studying the kinetics of crack growth in cyclic bending tests. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2020, vol. 86, no. 7, pp. 59–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>
9. Pustovoit V.N., Grishin S.A. Special features of fracture of carbon steel with a structure of laminar ferrite-carbide mixture. *Metal Science and Heat Treatment*. 1987, vol. 29, no. 3-4, pp. 262–266.
10. Nicholas T. *High Cycle Fatigue: a Mechanics of Materials Perspective*. Elsevier, 2006, 656 p.
11. Miklyaev P.G., Neshpor G.S., Kudryashov V.G. *Kinetics of Destruction*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 279 p. (In Russ.).
12. Cooper G.A., Kelly A. Tensile properties of fibre-reinforced metals: fracture mechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1967, vol. 15, no. 4, pp. 279–297. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(67\)90017-8](https://doi.org/10.1016/0022-5096(67)90017-8)
13. Greif R., Sanders J.L. The effect of a stringer on the stress in a cracked sheet. *Journal of Applied Mechanics*. 1965, vol. 32, no. 1, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1115/1.3625784>
14. Bloom J.M., Sanders J.L. The effect of a riveted stringer on the stress in a cracked sheet. *Journal of Applied Mechanics*. 1966, vol. 33, no. 3, pp. 561–570. <https://doi.org/10.1115/1.3625122>
15. Sanders J.L. Effect of a stringer on the stress concentration due to a crack in a thin sheet. *National Advisory Committee for Aeronautics*. 1959, no. 4207, p. 10.
16. Poe J.C.C. *Stress Intensity Factor for a Cracked Sheet with Riveted and Uniformly Spaced Stringers*. Washington: NASA Technical Report, TR R – 358, 1971, 62 p.
17. Pustovoit V.N., Duka V.V., Dolgachev Yu.V. Scenario of crack growth in steel with a ferrite-martensite composite structure. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 10 (205), pp. 118–121.
18. Pustovoit V.N., Duka V.V., Dolgachev Y.V., Aref'eva L.P., Fedosov V.V., Salynskih V.M. Features of destruction of a ferrite-martensitic composite. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 226, article 03006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822603006>
19. Irwin G.R., Paris P.C. *Fundamental aspects of crack growth and fracture*. In: *Engineering Fundamentals and Environmental Effects*. N.Y.: Academic Press, 1971, pp. 1–46.
20. Pugno N., Ciavarella M., Cornetti P., Carpinteri A. A generalized Paris' law for fatigue crack growth. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006, vol. 54, no. 7, pp. 1333–1349. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.01.007>

21. Jones R., Molent L., Pitt S. Similitude and the Paris crack growth law // *International Journal of Fatigue*. 2008. Vol. 30. No. 10–11. P. 1873–1880. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.016>
22. Turner C.E., Paris P.C., Erns H. On the relationship between work and crack tip stress intensity in elasticity and plasticity // *International Journal of Fracture*. 1981. Vol. 17. No. 6. P. R151–R154. <https://doi.org/10.1007/BF00681560>
23. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws // *Journal of Fluids Engineering*. 1963. Vol. 85. No. 4. P. 528–533. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3656900>
24. Panasyuk V.V., Ostash O.P., Kostyk E.M., Kudryashov V.G., Neshpor G.S. Cyclic crack resistance of aluminum alloys in the crack origin and growth stages // *Soviet Materials Science*. 1987. Vol. 23. No. 5. P. 473–479. <https://doi.org/10.1007/BF01148672>
25. Den Hartog J.P. *Advanced Strength of Materials*. N.Y.: Courier Corporation, 1987. 378 p.
26. Ross C.T.F., Chilver A. *Strength of Materials and Structures*. Oxford: Elsevier, 1999. 720 p.
27. Mott R.L., Untener J.A. *Applied Strength of Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 1172 p.
28. Da Silva V.D. *Mechanics and Strength of Materials*. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2005. 529 p.
29. Stephens R.C. *Strength of Materials: Theory and Examples*. London: Elsevier, 2013. 320 p.
30. Belyayev N.M. *Problems in Strength of Materials*. Oxford: Elsevier, 2016. 546 p.
21. Jones R., Molent L., Pitt S. Similitude and the Paris crack growth law. *International Journal of Fatigue*. 2008, vol. 30, no. 10–11, pp. 1873–1880. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.016>
22. Turner C.E., Paris P.C., Erns H. On the relationship between work and crack tip stress intensity in elasticity and plasticity. *International Journal of Fracture*. 1981, vol. 17, no. 6, pp. R151–R154. <https://doi.org/10.1007/BF00681560>
23. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Fluids Engineering*. 1963, vol. 85, no. 4, pp. 528–533. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3656900>
24. Panasyuk V.V., Ostash O.P., Kostyk E.M., Kudryashov V.G., Neshpor G.S. Cyclic crack resistance of aluminum alloys in the crack origin and growth stages. *Soviet Materials Science*. 1987, vol. 23, no. 5, pp. 473–479. <https://doi.org/10.1007/BF01148672>
25. Den Hartog J.P. *Advanced Strength of Materials*. N.Y.: Courier Corporation, 1987. 378 p.
26. Ross C.T.F., Chilver A. *Strength of Materials and Structures*. Oxford: Elsevier, 1999. 720 p.
27. Mott R.L., Untener J.A. *Applied Strength of Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 1172 p.
28. Da Silva V.D. *Mechanics and Strength of Materials*. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2005. 529 p.
29. Stephens R.C. *Strength of Materials: Theory and Examples*. London: Elsevier, 2013. 320 p.
30. Belyayev N.M. *Problems in Strength of Materials*. Oxford: Elsevier, 2016. 546 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Николаевич Пустовойт, д.т.н., профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение», Донской государственный технический университет

ORCID: 0000-0001-6999-3520

E-mail: fipm-dstu@mail.ru

Сергей Анатольевич Гришин, к.т.н., доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение», Донской государственный технический университет

ORCID: 0000-0002-7162-0093

E-mail: grishin60@yandex.ru

Юрий Вячеславович Долгачев, к.т.н., доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение», Донской государственный технический университет

ORCID: 0000-0002-8558-1136

E-mail: yuridol@mail.ru

Валентина Владимировна Дука, старший преподаватель кафедры «Физическое и прикладное материаловедение», Донской государственный технический университет

ORCID: 0000-0001-7266-7224

E-mail: valentina.duka.92@mail.ru

Viktor N. Pustovoi, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Physical and Applied Material Science”, Don State Technical University

ORCID: 0000-0001-6999-3520

E-mail: fipm-dstu@mail.ru

Sergei A. Grishin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Physical and Applied Material Science”, Don State Technical University

ORCID: 0000-0002-7162-0093

E-mail: grishin60@yandex.ru

Yurii V. Dolgachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Physical and Applied Material Science”, Don State Technical University

ORCID: 0000-0002-8558-1136

E-mail: yuridol@mail.ru

Valentina V. Duka, Senior Lecturer of the Chair “Physical and Applied Material Science”, Don State Technical University

ORCID: 0000-0001-7266-7224

E-mail: valentina.duka.92@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В. Н. Пустовойт – формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, анализ результатов исследований.

С. А. Гришин – методическое обеспечение и проведение усталостных испытаний на циклический изгиб, построение графиков.

Ю. В. Долгачев – участие в проведении усталостных испытаний на циклический изгиб, подготовка текста, формулирование выводов.

В. В. Дука – подготовка образцов для исследования, обработка экспериментальных результатов, доработка текста, корректировка выводов.

V. N. Pustovoi – formation of the basic concept, goals and objectives of research, scientific guidance, analysis of research results.

S. A. Grishin – methodological support and carrying out fatigue tests for cyclic bending, plotting.

Yu. V. Dolgachev – participation in fatigue tests for cyclic bending, preparation of the text, formulation of conclusions.

V. V. Duka – preparation of the research samples, processing of experimental results, revision of the text, correction of conclusions.

Поступила в редакцию 25.06.2021

После доработки 18.08.2021

Принята к публикации 23.08.2021

Received 25.06.2021

Revised 18.08.2021

Accepted 23.08.2021