4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 539.22:548 *Оригинальная статья*

Определение поверхностной энергии фазовых составляющих конструкционной стали по кинетике роста усталостной трещины

Л.П. Арефьева, В.В. Ковалева
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
Ludmilochka529@mail.ru, valentina.duka.92@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.522

Аннотация: Работа посвящена определению поверхностной энергии стали по экспериментальным данным роста трещины и проведение сравнения с результатами численного моделирования. Исследована кинетика усталостного разрушения образца стали 14Г2 со строчечной феррито-мартенситной структурой, полученной в результате неполной закалки и последующего низкого отпуска. Численное моделирование величин поверхностной энергии граней кристаллитов феррита и мартенсита проведено электронно-статистическим методом. В результате графического дифференцирования зависимости длины трещины от числа циклов нагружения получены величины скорости распространения трещины, оценены длины трещины и в модели Гриффитса рассчитаны поверхностные энергии каждой фазы. Погрешность определения косвенных величин, полученная в результате статистической обработки данных, составляет порядка 1%. Проведенный анализ показывает, что величины скорости роста трещины хорошо согласуется с результатами работ по определению скорости трещинообразования в нормализованных конструкционных сталях. Данные численного моделирования согласуются с экспериментальными данными в пределах до 16%, и со справочными данными 18%.

Ключевые слова: поверхностная энергия, предел прочности, трещина, конструкционная сталь, феррит, мартенсит, двухфазная структура.

Арефьева Людмила Павловна – д.ф.-м.н., доцент, профессор, кафедра «Материаловедение и технологии металлов», факультет «Технология машиностроения», ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»
Ковалева Валентина Владимировна – старший преподаватель, кафедра «Материаловедение и технологии металлов», факультет «Технология машиностроения», ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Original paper

Determination of the surface energy of the phase components of structural steel by the fatigue crack growth kinetics

L.P. Aref'eva, V.V. Kovaleva
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.522

Abstract: The work is devoted to the determination of the surface energy of steel from experimental data on the crack growth and comparison with results of numerical modeling. The kinetics of fatigue fracture of a steel 1.0481 sample with a line ferrite-martensite structure obtained as a result of incomplete hardening and subsequent low-temperature tempering is investigated. Numerical modeling of the values of the surface energy of the ferrite and martensite crystallite faces is carried out by the electron-statistical method. As a result of a graphical differentiation of the dependence of the crack length on the number of loading cycles, the values of the crack propagation rate were obtained, the crack lengths were also estimated, and the surface energies of each phase were calculated in the Griffiths model. The error in determining the indirect values, obtained as a result of statistical data processing, is approximately 1%. The analysis conducted shows that the values of the crack growth

© Л.П. Арефьева, В.В. Ковалева, 2026

rate are in good agreement with the results of studies on the rate of crack formation in normalized structural steels. The numerical simulation data are in agreement with experimental data within 16% and with reference data within 18%.
Keywords: surface energy, tensile strength, crack, structural steel, ferrite, martensite, two-phase structure.

Ludmila P. Aref'eva – Dr. Sc., Associate Professor, Professor, Department of Materials Science and Technology of Metals, Faculty of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University, ORCID: 0000-0003-2431-6897
Valentina V. Kovaleva – Senior Lecturer, Department of Materials Science and Technology of Metals, Faculty of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University, ORCID: 0000-0001-7266-7224

Поступила в редакцию/received: 12.07.2026; после рецензирования/revised: 20.08.2026; принята/accepted: 27.08.2026.

1. Введение

Причинами отказов деталей и узлов техники в первую очередь являются физико-механические и физико-химические процессы – трение и износ поверхностей, образование трещин при механическом воздействии, коррозия, перегрев [1-3]. Определяющую в роль в указанных процессах играет величина поверхностной энергии (ПЭ) моно- и поликристалла металлов. Например, образование трещины – это необратимый процесс образования двух новых поверхностей. С другой стороны, технологические режимы обработки конструкционных материалов также зависят от ПЭ [4, 5]. Связь поверхностных и механических свойств кристаллических тел лежит в основе метода скола, который в рамках модели Гриффитса позволяет определить ПЭ материала в процессе хрупкого разрушения.

Целью данной работы являлось определение ПЭ стали по экспериментальным данным роста трещины и механизма разрушения, а также сравнение с данными численного моделирования.

Задачи исследования: в модели Гриффитса определить величину ПЭ конструкционной стали, провести расчет ПЭ моно- и поликристаллов фаз стали электронно-статистическим методом, установить скорость распространения трещины для каждой фазы.

Объектом исследования выбрана конструкционная сталь 14Г2 с двухфазной феррито-мартенситной структурой, полученной в результате неполной закалки. Особенностью исследованных образцов являлось наличие строчечной структуры, с чередованием фаз феррита и мартенсита.

2. Методика исследования

Химический состав стали 14Г2 определялся для исходной строчечной ферритно-перлитной структуры на оптико-эмиссионном спектрометре Q8 MAGELLAN. Для получения феррито-мартенситной строчечной структуры сталь подвергали закалке из межкритического интервала температур (МКИ) при 730°С с последующим низкотемпературным отпуском при 200°С [6, 7]. Оценка состояния

микроструктуры стали 14Г2 с разной температурой закалки выполнялась с использованием микроскопа Neophot-21. Измерение микротвердости фаз осуществлялось на приборе ПМТ-3. Объемная доля, а также геометрические параметры структурных составляющих определялись с помощью программного пакета ImageJ [8].

В рамках исследования были определены механические характеристики разрушения путем анализа развития трещины усталостного циклического разрушения стали марки 14Г2, обладающей ориентированной слоистой феррито-мартенситной структурой.

Экспериментальные данные кинетики и механизма разрушения получены по методике [9] на специальной установке для наведения усталостной трещины и ее развития при циклическом нагружении. Образцы представляли собой четырехгранную призму (10×10×100 мм), с предварительно нанесенным «U»-образным концентратором ($r = 0{,}25$ мм, глубина 1,5 мм). Испытания на циклический изгиб осуществлялись в рамках отнулевого цикла нагружения. В этом цикле изгибающий момент вызывал в образце исключительно растягивающие напряжения. Сжимающие напряжения были равны нулю. Процесс развития трещины фиксировался методом электропотенциалов в координатах «длина трещины L_{cr} – число циклов N_{cyc}».

Связь предела прочности σ_u, длины трещины L_{cr} и ПЭ f_ω выражается аналитически с помощью критерия Гриффитса для квазиупругой деформации

$$2f_\omega = \frac{\pi\sigma_u^2\left(1-\mu^2\right)L}{E}, \qquad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости, $L = L_{cr}/2$. Таким образом, ПЭ металла можно получить по экспериментальным данным длины трещины и предела прочности.

Расчет ПЭ стали проводился электронно-статистическим методом для каждой металлической фазы. Так как объектом исследования является сталь 14Г2, то необходимо, во-первых, учитывать химический состав каждой фазы, во-вторых, принимать во внимание характер расположения атомов углерода и примесных элементов в кристаллических решетках фаз. Для феррита считалось, что углерод является примесью внедрения и растворяется в очень малых количествах, практически не изменяя параметр решетки. Для мартенсита учтено влияние растворения углерода на степень тетрагональности структуры. Марганец в данной стали образует сульфиды и фосфиды, наличие которых в численном моделировании не принимаем во внимание, так как они являются отдельной неметаллической фазой.

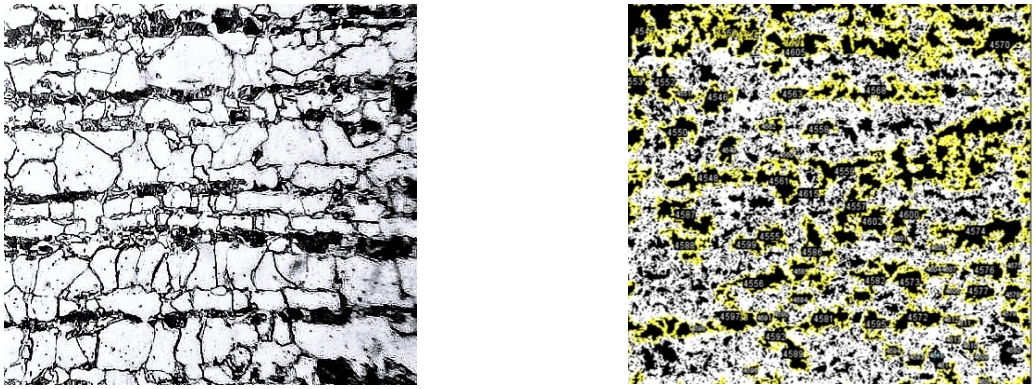
Численные расчеты ПЭ проводились для случая границы металл-вакуум по Томасу-Ферми с поправками при температуре T относительно поверхности Гиббса по формуле:

$$f_\omega(hkl) = f_\omega^0(hkl) + T\left(df_\omega(hkl)/dT\right) \quad (2)$$

Слагаемое $f_\omega^0(hkl)$ – значение ПЭ металла при 0 К, полученное в рамках электронно-статистического метода при учете квантовых поправок и термического влияния $\left(T\left(df_\omega(hkl)/dT\right)\right)$ [10].

3. Результаты и обсуждение

Результаты оптико-эмиссионного анализа химического состава стали 14Г2: 0,16% C (здесь и далее по массе) 0,32% Si; 1,53% Mn; 0,27% Ni; 0,21% Cr; 0,23% Cu; – 0,038% S; 0,031% P, ~0,06% As. Микроструктура 14Г2 после проведения закалки из МКИ от температуры 730°С показана на рис. 1 (светлая фаза-феррит, темная фаза – мартенсит).



а б

Рис. 1. Изображение микроструктуры стали 14Г2: а – после закалки из МКИ на 730°С; б – последовательное картирование в программе ImageJ. Увеличение ×360.

Известно, что с увеличением температуры закалки количество углерода в мартенсите уменьшается, а его объемная доля увеличивается. С помощью программы ImageJ установлено, что соотношение объемных долей феррита и мартенсита составила – 70/30 [8].

Последовательное картирование микроструктуры позволило определить форму и средний размер упрочняющих волокон мартенсита (см. рис. 1 б). Средняя длина упрочняющего волокна в строках составила 160 мкм, средняя толщина строки – 30 мкм. Форма и размеры частиц мартенсита и феррита позволяет считать механизм разрушения хрупким [11].

Методом графического дифференцирования зависимости длины трещины от числа циклов нагружения (см. рис. 2), опираясь на уравнение Пэриса [12], получены значения скорости роста трещины $v = dL_{cr}/dN_{cyc}$ в

феррите и мартенсите. На графике кинетики роста трещины можно выделить 5 участков, на которых наблюдается ступенчатое распространение трещины, что согласуется с ранее полученными результатами работы [9]. Ступенчатый рост объясняется тем, что при подходе к границе фаз происходит расслоение в феррите, вследствие чего затрачивается энергия и трещина меняет направление движения [13]. Каждый участок анализировался отдельно, определялись длины ступеней, углы их наклона и рассчитывалась скорость роста трещины в каждой фазе. Статистическая обработка результатов измерений углов проводилась по методу Стьюдента и далее оценивалась погрешность косвенных измерений скорости Δv.

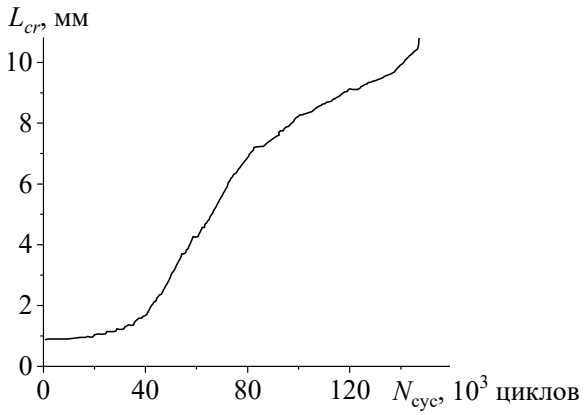


Рис. 2. Зависимость длины трещины от числа циклов нагружения.

Значения скорости разрушения феррита составили $(5{,}35\pm0{,}051)\cdot10^{-6}$ мм/цикл, мартенсита $(2{,}755\pm0{,}021)\cdot10^{-4}$ мм/цикл, что по порядку величины хорошо согласуется с результатами работ [14, 15], посвященных исследованию кинетики усталостного трещинообразования в сталях 9Г2, 40ХНМ, 40Х, стали 40 в нормализованном состоянии и 38Х2НМА, 40Х после закалки и последующего нагрева до 300°С.

Значения микротвердости мартенсита при температурах 730°С и 760°С составили 7,24 МПа и 5,72 МПа.

По выражению (1) с использованием полученных величин длин трещины в фазах и справочных данных механических свойств [16] проведена оценка ПЭ феррита и мартенсита (см. Таблицу 1). Оценена величина ПЭ двухфазной структуры по длине трещины и по объемным долям фаз: 2075 мДж/м^2 и 1886 мДж/м^2 соответственно.

Электронно-статистическим методом рассчитали ПЭ граней феррита и мартенсита стали 14Г2, полученных при разных температурах (730°С и 760°С). Графический анализ диаграммы состояния $Fe-Fe_3C$ показал, что содержание углерода в мартенсите и феррите при температуре закалки 730°С составило 0,115% и 0,0187% соответственно, а при температуре

760°C – 0,097% и 0,0125% соответственно. Так как растворимость углерода в феррите мала, его влияние на период кристаллической решетки и поверхностные свойства минимально. Для мартенсита учитывалось изменение степени тетрагональности структуры, возникающее вследствие растворения углерода. Расчеты выполнены для температуры 293 К. Для сравнения с экспериментальными данными проведено усреднение значений ПЭ по граням ($\overline{f_\omega}$). Результаты расчетов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Поверхностная энергия фазовых составляющих стали 14Г2.

hkl	$f_\omega(hkl)$, мДж/м^2					
	Эксперимент		феррит	мартенсит (730°C)	мартенсит (760°C)	[16]
	феррит	мартенсит				
001			1796	1139	1139	1480
100				1210	1226	
101				1189	1201	
110			1675	1186	1198	
111			2136	1237	1231	
$\overline{f_\omega}$, мДж/м^2	2209	1402	1999	1208	1209	

Как показывают полученные результаты, для мартенсита с объемно-центрированной тетрагональной решеткой выполняется правило – чем больше плотность упаковки грани, тем меньше величина ПЭ. Увеличение содержания углерода в мартенсите приводит к уменьшению ПЭ, что согласуется с известным критерием поверхностной активности, сформулированному по изменению температуры ликвидуса.

Результаты расчета ПЭ грани (100) феррита согласуется со справочными данными для грани (100) железа в переделах до 20% [16], что можно считать хорошим согласием имея в виду разницу в химическом составе и геометрических характеристиках кристаллической решетки. Значение ПЭ феррита и мартенсита, определенные по экспериментальным данным длины трещины в модели Гриффитса, согласуются с результатами численного моделирования в пределах 10,5% и 16,1% соответственно. Указанная разница в величинах ПЭ может объясняться тем, что при расчетах ПЭ не учитывалось растворение марганца и других примесей в обеих фазах. Также следует иметь в виду, что в образце стали 14Г2 присутствуют неметаллические включения, которые тоже влияют на кинетику роста трещины.

4. Заключение

Из полученных экспериментальных и теоретических данных можно заключить, что предложенная методика определения ПЭ отдельных фаз конструкционной стали может применяться в научных исследованиях и для разработки технологий обработки сталей. В тоже время, данные

численного моделирования, при учете растворения примесей в фазах для повышения точности, можно использовать для прогнозирования трещинностойкости стали, в частности при усталостном нагружении.

Библиографический список:

1. **Горбовец, М.А.** Испытания конструкционных металлических материалов на скорость роста трещины усталости в коррозионно-активной среде (обзор) / М.А. Горбовец, И.А. Ходинев, С.А. Монин // Труды ВИАМ. – 2022. – № 12 (118). – С. 135-144. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144.
2. **Пустовойт, В.Н.** Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита / В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев, Ю.М. Домбровский // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 3. – С. 54-59. DOI: 10.23947/2541-9129-2022-3-54-59.
3. **Атрошенко, С.А.** Структурно-фазовое состояние металла рельса с внутренней трещиной после длительной эксплуатации / С.А. Атрошенко, С.С. Майер, В.И. Смирнов // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – № 9. – С. 1363-1368. DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51215.72-21.
4. **Исламова, А.**Г. Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали / А.Г. Исламова, Д.В. Феоктистов, Е.Г. Орлова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-матматическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2021. – Т. 7. – № 1 (25). – С. 60-78. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78.
5. **Musokhranov, M.V.** Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels / M.V. Musokhranov, V.V. Kalmykov, E.N. Malyshev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V. 12. – № 17. – P. 6428-6433.
6. **Пустовойт, В.Н.** Структурная организация и свойства естественного стального ферритно-мартенситного композита / В.Н. Пустовойт, Ю.М. Домбровский, Ю.В. Долгачев, В.В. Дука // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. – № 6 (780). – С. 15-21. DOI: 10.30906/mitom.2020.6.15-21.
7. **Пустовойт, В.Н.** Структурная организация стали для обеспечения безопасности специальной техники / В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев, И.В. Иванков // Безопасность техногенных и природных систем. – 2023. – № 1. – С. 70-75. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-1-70-75.
8. **Дука, В.В**. Идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ / В.В. Дука, Л.П. Арефьева // Безопасность техногенных и природных систем. – 2025. – Т. 9. – № 3. – С. 221-229. DOI: 10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229.
9. **Пустовойт, В.Н.** Усталостное разрушение стали со структурой феррито-мартенситного композита / В.Н. Пустовойт, С.А. Гришин, Ю.В. Долгачев, В.В. Дука // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 92-97. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-2-92-97.
10. **Шебзухова, И.Г.** Анизотропия поверхностной энергии и работы выхода электрона IIB металлов / И.Г. Шебзухова, Л.П. Арефьева // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 2. – С. 306-309. DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47087.188-18.
11. **Арефьева, Л.П.** Взаимосвязь структурно-фазового состава с механизмом разрушения высокопрочной строительной стали / Л.П. Арефьева, В.В. Дука, И.Ю. Забияка // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48. – № 8. – С. 39-42. DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52366.19093.
12. **Голубовский, Е.Р.** Метод определения границ стадии устойчивого роста трещины усталости и параметров уравнения Пэриса / Е.Р. Голубовский, М.Е. Волков, Н.М. Эммаусский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №9. – С. 66-74. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-9-66-74.
13. **Pustovoit, V.N.** Structural organization and properties of a natural ferrite-martensite steel composite / Pustovoit V.N., Dolgachev YU.V., Dombrovskii YU.M., Duka V.V. // Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – V. 62. – I. 5-6. – P. 369-375. DOI: 10.1007/s11041-020-00570-9.
14. **Клевцов, Г.В.** Кинетика и механизм усталостного разрушения образцов из сталей 40Х и 38Х2Н2МА / Г.В. Клевцов, Д.Л. Мерсон, Н.А. Клевцова, Е.Д. Мерсон, М.Л. Линдеров, С.В. Засыпкин, А.В. Бондаренко // Вектор науки тольяттинского государственного университета. – 2019. – № 1 (47). – С. 30-36. DOI: 10.18323/2073-5073-2019-1-30-36.
15. **Савкин, А.Н.** Кинетика и продолжительность роста усталостных трещин в сталях при переменном нагружении / А.Н. Савкин, Р. Сундер, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 61-70. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.07.
16. Свойства элементов. Справочник / под общей ред. проф. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.

References:

1. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Ispytaniya konstruktsionnykh metallicheskikh materialov na skorost' rosta treshchiny ustalosti v korrozionno-aktivnoy srede (obzor) [Tests of structural metallic materials for the fatigue crack growth rate in a corrosive environment (review)], *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2022, no. 12 (118), pp. 135-144. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144. (In Russian).
2. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V., Dombrovskii Yu.M. Ballisticheskaya stoykost' stali so strukturoy yestestvennogo ferrito-martensitnogo kompozita [Ballistic resistance of steel with the structure of a natural ferrite-martensitic composite], *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh system [Safety of Technogenic and Natural Systems]*, 2022, no. 3, pp. 54-59. DOI: 10.23947/2541-9129-2022-3-54-59. (In Russian).
3. Atroshenko S.A., Maier S.S., Smirnov V.I. Structural phase state of the metal of a rail with an internal crack after long-term operation, *Technical Physics,* 2021, vol. 66, issue 11, pp 1171-1176. DOI: 10.1134/S1063784221090024.
4. Islamova A.G., Feoktistov D.V., Orlova E.G. Vliyanie sherokhovatosti na poverkhnostnuyu energiyu i smachivaemost' poverkhnostey medi i stali [Influence of the copper and steel surfaces' roughness on surface energy and wettability], *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika* [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy]*,* 2021, vol. 7, no. 1 (25), pp. 60-78. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78. (In Russian).
5. Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 17, pp. 6428-6433.
6. Pustovoit V.N., Dolgachev YU.V., Dombrovskii YU.M., Duka V.V. Strukturnaya organizatsiya i svoystva yestestvennogo stal'nogo ferritno-martensitnogo kompozita [The structure and properties of a natural steel ferritic-martensitic composite], *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*, 2020, no. 6(780), pp.15-21. DOI: 10.30906/mitom.2020.6.15-21. (In Russian).
7. Pustovoit V.N., Dolgachev Yu.V., Ivankov I.V. Structural organization of steel to ensure special equipment safety, *Safety of Technogenic and Natural Systems*, 2023, no. 1, pp. 70-75. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-1-70-75
8. Duka V.V., Aref'eva L.P. Surface morphology identification of steel natural ferrite-martensitic composite using imagej software, *Safety of Technogenic and Natural Systems,* 2025, vol. 9, no. 3, pp. 221-229. DOI: 10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229. (In Russian).
9. Pustovoit V.N., Grishin S.A., Dolgachev YU.V., Duka V.V. Ustalostnoye razrusheniye stali so strukturoy ferrito-martensitnogo kompozita [Fatigue fracture of steel with ferrite-martensite composite structure], *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous metallurgy]*, 2022, vol. 65, no. 2, pp. 92-97. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-2-92-97. (In Russian).
10. Shebzukhova I.G., Aref'eva L.P. Anisotropy of the surface energy and work function of IIB metals, *Technical Physics*, 2019, vol. 64, issue 2, pp. 274-277. DOI: 10.1134/S1063784219020208.
11. Aref'eva L.P., Duka V.V., Zabiyaka I.Y. Relationship between the structural-phase composition and the fracture mechanism of high-strength contraction steel, *Technical Physics Letters,* 2022, vol. 48, no. 4, pp. 72-74. DOI: 10.21883/TPL.2022.04.53490.19093.
12. Golubovskiy E.R., Volkov M.E., Emmausskiy N.M. Metod opredeleniya granits stadii ustoychivogo rosta treshchiny ustalosti i parametrov uravneniya Perisa [A method for determination of the boundaries of the stage of steady fatigue crack growth and parameters of Paris equation], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratopy. Diagnostics of materials],* 2019, vol. 85, no. 9, pp. 66-74. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-9-66-74. (In Russian).
13. 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, issue 5-6, pp. 369-375. DOI: 10.1007/s11041-020-00570-9.
14. Klevtsov G.V., Merson D.L., Klevtsova N.A. et al Kinetika i mekhanizm ustalostnogo razrusheniya obraztsov iz staley 40KH i 38KH2N2MA [The kinetics and mechanism of the fatigue fracture of samples of 40H and 38H2N2MA steels], *Vektor nauki tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta [Science Vector of Togliatti State University],* 2019, no. 1(47), pp. 30-36. DOI: 10.18323/2073-5073-2019-1-30-36. (In Russian).
15. Savkin A.N., Sunder R., Badikov K.A., Sedov A.A. Kinetika i prodolzhitel'nost' rosta ustalostnykh treshchin v stalyakh pri peremennom nagruzhenii [Fatigue crack growth kinetic on steels under variable amplitude loading], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin],* 2018, no. 3, pp. 61-70. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.07. (In Russian).
16. *Svoystva elementov. Spravochnik* [Properties of elements. Handbook], ed. M.E. Drits, Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 672 p. (In Russian).