

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 620.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ НА СТРУКТУРУ И ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 08Г2С

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В настоящей работе проведен комплекс исследований стали 08Г2С, полученной методом 3D-печати электродуговой наплавкой при различных значениях погонной энергии Q . Были выполнены микроструктурные исследования и низкотемпературные испытания на ударный изгиб исследуемой стали после различных режимов наплавления. Установлено, что с увеличением погонной энергии Q процесса 3D-печати наблюдается монотонное увеличение среднего размера зерна металла. Исследование показывает, что в качестве оптимального с точки зрения получения однородной мелкозернистой микроструктуры стали 08Г2С, обеспечивающей высокую хладостойкость, может быть выбран режим 3D-печати с погонной энергией $Q = 425$ Дж/мм. По результатам низкотемпературных испытаний на ударный изгиб стали 08Г2С установлено, что с понижением температуры наблюдается увеличение хрупкой составляющей в изломе и монотонное снижение значений ударной вязкости. Температура вязкохрупкого перехода t_{50} для стали 08Г2С составила -40°C . Также была установлена связь ударной вязкости исследуемого материала со средним размером зерна в широком диапазоне пониженных температур. Проведенная в ходе исследования цифровая обработка изображений микроструктур с использованием разработанного в среде MATLAB программного обеспечения показала, что фрактальная размерность D изображения микроструктуры стали 08Г2С имеет линейную зависимость со средним размером зерна d и может быть использована в качестве количественного показателя для оперативной оценки хладостойкости. С практической стороны полученные в результате работы зависимости могут быть использованы для прогнозирования ударной вязкости и среднего размера зерна низкоуглеродистых марганцовистых сталей в зависимости от режимов 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-печать, сталь 08Г2С, структура, ударная вязкость, хладостойкость, фрактальная размерность.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-370.2021.4 «Оценка хладостойкости и изучение механизмов разрушения металлов, полученных на основе 3D-печати, для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в условиях Арктики и Крайнего Севера».

© Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В., 2021

Для цитирования

Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Рябов Д.А., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 64–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY ON THE INFLUENCE OF 3D PRINTING MODES ON THE STRUCTURE AND COLD RESISTANCE OF STEEL GRADE 08G2S

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper describes a set of studies carried out on steel grade 08G2S produced by 3D printing by electric arc surfacing at various values of heat input Q . The authors performed a microstructure analysis and low-temperature impact bending tests of the steel grade under study after different deposition schedules. It was found that there was a monotonic increase in the average grain size of the steel with an increase in heat input Q of the 3D printing process. The study shows that the 3D printing mode with heat input Q of 425 J/mm can be selected as optimal from the point of view of producing a homogeneous fine-grained microstructure of steel grade 08G2S, providing high cold resistance. According to the results of low-temperature impact bending tests of steel grade 08G2S, there was an increase in a brittle component in the fracture and a monotonic decrease in impact toughness with decreasing temperature. Ductile-brittle transition temperature t_{50} for steel grade 08G2S was -40°C . The authors also found a relationship between impact strength of the material under study and the average grain size in a wide range of low temperatures. The digital processing of microstructure images carried out in the course of the study using software developed in the MATLAB environment showed that fractal dimension D of the microstructure image of steel grade 08G2S had a linear relationship with average grain size d and can be used as a quantitative indicator for a quick assessment of cold resistance. From the practical side, the dependences found as a result of the research can be used to predict impact strength and an average grain size of low-carbon manganese steels depending on 3D printing modes.

Keywords: 3D printing, steel grade 08G2S, structure, impact strength, cold resistance, fractal dimension.

The research was funded by grant of the President of the Russian Federation MK-370.2021.4 "Assessment of cold resistance and study on mechanisms of fracture of metals produced by 3D printing to ensure a safe operation of facilities in the Arctic and the Far North".

For citation

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V. Study on the Influence of 3D Printing Modes on the Structure and Cold Resistance of Steel Grade 08G2S. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 4, pp. 64–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70>

Введение

В настоящее время все большее количество деталей механизмов и конструкций северного исполнения получают с использованием технологии 3D-печати металлами [1]. Наиболее универсальной и перспективной технологией 3D-печати металлами является электродуговая наплавка. Данная технология позволяет оперативно изготавливать новые детали и восстанавливать изношенные компоненты в непосредственной близости от места, где это необходимо. При этом уменьшается время не только на изготовление, но и на доставку [2].

При выборе материалов для изготовления деталей, длительно работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, возникает необходимость обеспечения мониторинга изменений физико-механических характеристик материала в процессе эксплуатации. Однако такая оценка, особенно при пониженных температурах, является трудо-

емкой, а в ряде случаев практически нереализуемой задачей. Поэтому требуется применение экспресс-методов оценки служебных свойств материала, в частности на основе анализа изображений структур металла.

Наиболее важной характеристикой металла, работающего в условиях пониженных температур, является показатель ударной вязкости, характеризующий работу, затраченную на поглощение энергии удара и отражающий вероятность хрупкого разрушения [3].

Известно, что значения ударной вязкости металлов зависят от размера зерна [4]. В связи с этим ключевой задачей является исследование связи характеристик микроструктуры (размер зерна, фрактальная размерность) полученного металла со значениями ударной вязкости с целью оценки хладостойкости.

В настоящее время для определения среднего размера зерна металла, кроме классических методов (ГОСТ 5639), все чаще применяются подходы

фрактального анализа, основанные на взаимосвязи показателя фрактальной размерности микроструктуры с размером зерна металла [5, 6].

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в установлении связи режимов 3D-печати электродуговой наплавкой со структурными и механическими характеристиками материала для прогнозирования его хладостойкости.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступала марганцовистая хладостойкая сталь 08Г2С. Химический состав стали 08Г2С приведен в табл. 1. Исследуемая сталь получена методом 3D-печати электродугой наплавкой на станке с ЧПУ (рис. 1) в среде защитного газа (CO_2) при различных режимах печати. После 3D-печати, с целью улучшения эксплуатационных характеристик, сталь 08Г2С была подвергнута отжигу (930°C , охлаждение с печью).

Таблица 1. Химический состав исследуемой стали, мас. %

Table 1. Chemical composition of the steel grade under study, wt%

Материал	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
08Г2С	0,08	0,9	1,9	0,12	0,008	0,12	0,14	0,09	Ост.

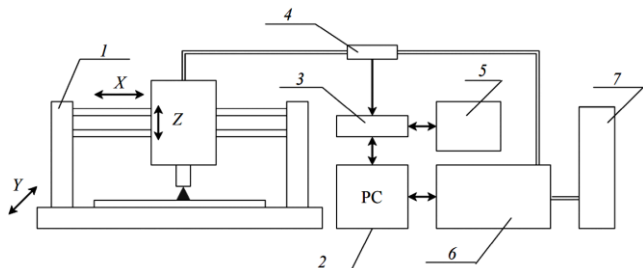


Рис. 1. Экспериментальный стенд по 3D-наплавке на базе станка с ЧПУ: 1 – 3-координатный станок с ЧПУ портального типа; 2 – ПК; 3 – АЦП/ЦАП; 4 – датчики силы тока и напряжения; 5 – система ЧПУ; 6 – сварочный полуавтомат; 7 – баллоны с защитным газом

Fig. 1. 3D surfacing experimental bench based on a CNC machine: 1 is a 3-axis gantry-type CNC machine; 2 is a personal computer; 3 is ADC/DAC; 4 is current and voltage sensors; 5 is a CNC system; 6 is a welding semi-automatic device; 7 is shielding gas cylinders

Режим наплавки задавали с использованием следующих параметров: сила тока I , напряжение U , дуговой зазор z , скорость подачи проволоки V и расход защитного газа. При этом дуговой зазор, скорость подачи проволоки и расход защитного газа был постоянным для всех экспериментов и составляли 11 мм и 350 мм/мин соответственно.

По режимам 3D-печати определялась погонная энергия Q процесса (электрическая энергия, расходуемая на единицу длины шва) как один из комплексных информативных параметров по зависимости согласно ГОСТ Р ИСО 857-1-2009 с учетом коэффициента энергетических потерь 0,8:

$$Q = \frac{0,8 \cdot I \cdot U}{V}.$$

Погонная энергия процесса изменялась в диапазоне от 150 до 1200 Дж/мм, с учетом возможностей стенда.

Для оценки хладостойкости и показателей ударной вязкости стали проводились испытания образцов типа Шарпи на ударный изгиб по ГОСТ 9454 в широком диапазоне пониженных температур. Изготовление образцов на ударный изгиб производилось на том же экспериментальном стенде (см. рис. 1), при этом наплавляющее оборудование заменили на оборудование для последующей механической обработки [7]. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-30А в диапазоне температур $-80...+20^\circ\text{C}$ в соответствии с требованиями ГОСТ 9454. Охлаждение образцов до необходимой температуры осуществлялось в специально разработанной криокамере [8].

Исследование микроструктуры стали проводили на оптическом микроскопе KYENCE-VHX 1000. Размер зерна металла определялся по методике, изложенной в ГОСТ 5639.

Фрактальная размерность D является одним из количественных показателей изображения. На основе показателя фрактальной размерности структуры и (или) изломов материала могут быть выявлены различные его характеристики, в частности ударная вязкость. Согласно методике, описанной авторами [9], определялась фрактальная размерность по изображениям микроструктуры после предварительной обработки с использованием специально разработанного программного обеспечения в среде MATLAB.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты микроструктурного анализа стали 08Г2С, полученной при различных режимах 3D-печати, представлены на рис. 2. Показано, что равномерность распределения и форма ферритных зерен структуры стали 08Г2С значительно зависят от подведенной при наплавлении энергии. Таким образом, наиболее однородной (с точки зрения распределения размеров зерен) и приемлемой (наименьшая анизотропия) структурой обладает материал, полученный при значениях погонной энергии $Q = 425$ Дж/мм.

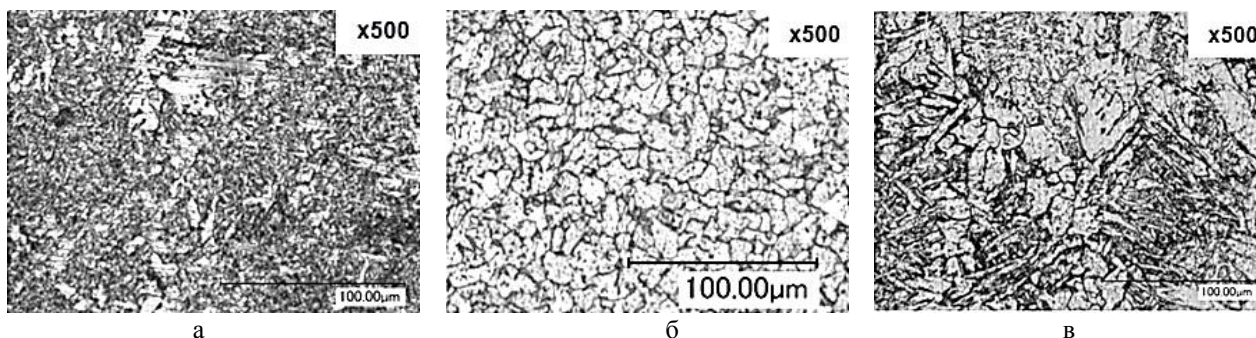


Рис. 2. Микроструктура стали 08Г2С при значениях погонной энергии: а – 190 Дж/мм; б – 425 Дж/мм; в – 475 Дж/мм

Fig. 2. Microstructure of steel grade 08G2S at heat input values: а is 190 J/mm; б is 425 J/mm; в is 475 J/mm

На основании микроструктурного анализа и рассчитанного среднего размера зерна структуры стали 08Г2С получена зависимость среднего размера зерна d от погонной энергии процесса 3D-печати Q , показанная на рис. 3.

Как видно из рис. 3, полученные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью с величиной достоверности $R^2=0,95$. Данная зависимость дает возможность прогнозировать размер зерна стали 08Г2С в зависимости от режимов 3D-печати и хорошо согласуется с результатами исследований в процессе сварки стали 09Г2С [10].

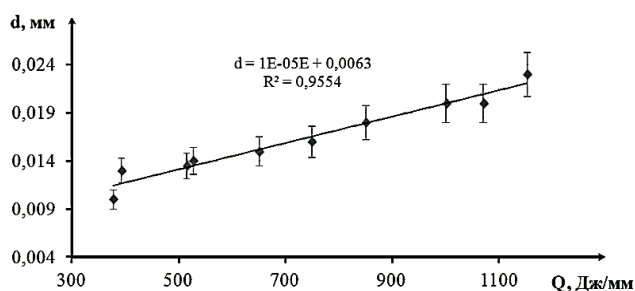


Рис. 3. Зависимость среднего размера зерна d от погонной энергии Q процесса 3D-печати электродуговой наплавкой

Fig. 3. Dependence of average grain size d on heat input Q of the 3D printing process with electric arc surfacing

Известно, что понижение среднего размера зерна металла приводит к росту механических свойств, включая показатели ударной вязкости [11, 12]. По результатам микроструктурных исследований (см. рис. 2) установлено, что при погонной энергии) ниже 190 Дж/мм наблюдаются дефекты структуры в виде пор и не расплавившейся проволоки. В связи с этим в качестве оптимального режима печати выбран режим с погонной энергией $Q = 425$ Дж/мм, обеспечивающий однородную структуру стали 08Г2С, без дефектов и с малым средним размером зерна.

В результате испытаний на ударный изгиб получены данные по ударной вязкости и механизмам разрушения стали 08Г2С, наплавленной при оптимальном режиме 3D-печати (табл. 2).

Таблица 2. Результаты испытаний на ударный изгиб стали 08Г2С (при величине погонной энергии $Q = 425$ Дж/мм)

Table 2. Impact bending test of steel grade 08G2S (with heat input $Q = 425$ J/mm)

Температура испытания $t, ^\circ\text{C}$	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²	Механизм (характер) разрушения
+20	105	В
0	100	С (80%)
-20	90	С (65%)
-40	66	С (50%) – T_{50}
-60	46	С (15%)
-80	22	Х

Примечание. В – полностью вязкий (волокнустый) излом; Х – полностью хрупкий излом (преимущественно скол и фасетки скола); С – смешанный излом (% вязкой составляющей в изломе)

Как видно из полученных данных (см. табл. 2), с понижением температуры испытания наблюдается снижение ударной вязкости и монотонное увеличение хрупкой составляющей в изломе. Так, при температуре $t = -40^\circ\text{C}$, вблизи которой наблюдается вязкохрупкий переход (t_{50}), происходит значительное снижение ударной вязкости, в связи с этим эксплуатация конструкций из исследуемого металла при данных температурах небезопасна и значительно увеличивает вероятность хрупкого разрушения.

Также по результатам испытаний на ударный изгиб были получены значения ударной вязкости и при других значениях погонной энергии. По полученным статистическим данным построена зависимость ударной вязкости от среднего разме-

ра зерна при температурах $t = +20^{\circ}\text{C}$ и температуре вязкохрупкого перехода $t_{50} = -40^{\circ}\text{C}$. Полученные зависимости отображены на **рис. 4**.

Полученные зависимости ударной вязкости от величины зерна подтверждают их связь и схожи с результатами проведенных ранее исследований [11, 12].

По результатам предварительной обработки (показаны на 4-х этапах на **рис. 5**) изображений микроструктур получена линейная зависимость фрактальной размерности изображения D от средней величины зерна стали 08Г2С (**рис. 6**), что согласуется с результатами исследований других авторов [5, 6].

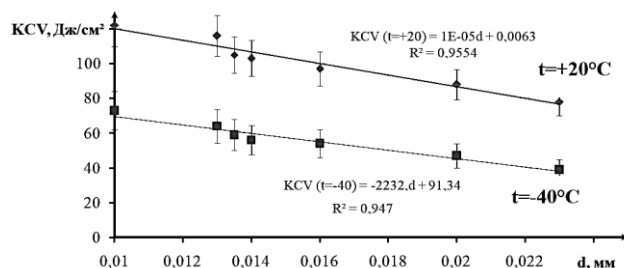


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости стали 08Г2С от средней величины зерна

Fig. 4. Dependence of impact toughness of steel grade 08G2S on the average grain size

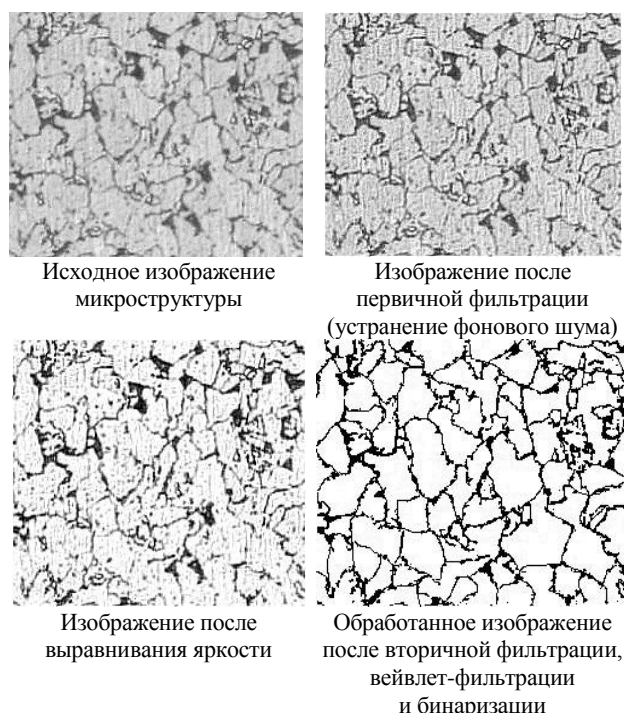


Рис. 5. Предварительная обработка изображений микроструктур

Fig. 5. Pre-processing of microstructure images

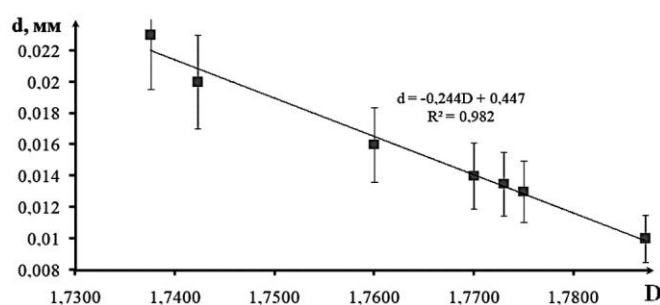


Рис. 6. Зависимость фрактальной размерности изображения микроструктуры стали 09Г2С от средней величины зерна

Fig. 6. Dependence of the fractal dimension of the microstructure image of steel grade 09G2S on the average grain size

Закключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Между погонной энергией процесса 3D-печати Q и величиной зерна стали 08Г2С имеется линейная зависимость. Показано, что при увеличении погонной энергии 3D-печати электродуговой наплавкой наблюдается монотонное увеличение размера зерна.

2. Установлено, что при значениях погонной энергии ниже 190 Дж/мм наблюдаются дефекты структуры металла (поры и элементы нерасплавившейся проволоки).

3. Оптимальным режимом 3D-печати электродуговой наплавкой стали 08Г2С является режим с погонной энергией $Q = 425$ Дж/мм, обеспечивающий однородную структуру стали 08Г2С. При таком режиме формируется мелкая зернистая структура с отсутствием макродефектов.

4. Показана связь ударной вязкости с величиной зерна для стали 08Г2С, позволяющая прогнозировать ударную вязкость металла без проведения испытаний на ударный изгиб с высокой степенью достоверности.

5. Для экспресс-прогнозирования хладостойкости стали 08Г2С может быть использован подход фрактального анализа изображения микроструктуры материала.

Список литературы

1. Елистратова А.А., Коршакевич И.С. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. С. 557–559.
2. Comparison and analysis of different 3D printing techniques. International Journal of Latest Trends in Engi-

neering and Technology. Vol. (8). Issue (4–1), pp. 264–272. DOI:10.21172/1.841.44

3. Tong L. Low temperature impact toughness of high strength structural steel / L. Tong, L. Niu, S.Jing, L. Ai, X. Zhao // Thin-Walled Structures. 2018. Is. 132. pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.009
4. Khlybov A.A. et al. The effect of low temperatures on the operability of products 20GL steel. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1431 012063. DOI:10.1088/1742-6596/1431/1/012063
5. Шахов В. Н., Богданов В. В. Оценка балла зерна методом фрактального анализа // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-balla-zerna-metodom-fraktalnogo-analiza> (дата обращения: 27.07.2021).
6. Малых М.В., Собко С.А., Титова О.В. Применение фрактального анализа для определения размера зерна деформированных материалов. URL: <https://www.sphti.ru/wp-content/uploads> (дата обращения: 27.07.2021).
7. Kabaldin Yu. G. Diagnostics of 3D printing on a CNC machine by machine learning / Yu.G. Kabaldin, D.A. Shatagin, M.S. Anosov, P.V. Kolchin, A.V. Kiselev // Russian Engineering Research. 2021, vol. 41, № 4, pp. 320–324.
8. Проблемы обеспечения безопасной эксплуатации тележек грузовых вагонов при отрицательных температурах / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, Д.А. Рябов, В.И. Сентюрева // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 18–26. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-18-26
9. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033076 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/3/033076
10. Полетаев Ю.В. Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С / Ю.В. Полетаев, В.Ю. Полетаев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 18, № 1. С. 50–58.
11. Узлов И.Г. Влияние параметров микроструктуры колесной стали на её вязкие свойства / И.Г. Узлов, А.И. Бабченко, Ж.А. Дементьева, А.А. Кононенко, А.Л. Сафронов // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. Днепропетровск.: ИЧМ НАН Украины, 2007. Вип. 14. С. 202–210.
12. Топоров Г.В., Смокотин Г.Я. Влияние величины зерна на ударно-усталостную стойкость стали 45 // Известия Томского политехнического института [Известия ТПИ]. 1958. Т. 106: Бурильные машины. С. 153–164.

References

1. Elistratova A.A., Korshakevich I.S. 3D printing technologies: advantages and disadvantages. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current problems of aviation and cosmonautics], 2015, vol. 1, pp. 557–559. (In Russ.)
2. Comparison and analysis of different 3D printing techniques. International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology. 2017, vol. (8), issue (4–1), pp. 264–272. DOI:10.21172/1.841.44
3. Tong L., Niu L., Jing S., Ai L., Zhao X. Low temperature impact toughness of high strength structural steel. Thin-Walled Structures. 2018, issue 132, pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.009
4. Khlybov A.A. et al. The effect of low temperatures on the operability of products 20GL steel. 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1431 012063. DOI:10.1088/1742-6596/1431/1/012063
5. Shakhov V.N., Bogdanov V.V. Evaluation of grain points by a fractal analysis method. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current problems of aviation and cosmonautics], 2014, no. 10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-balla-zerna-metodom-fraktalnogo-analiza> (Accessed on July 27, 2021).
6. Malykh M.V., Sobko S.A., Titova O.V. Application of a fractal analysis to determine the grain size of deformed materials. Available at: <https://www.sphti.ru/wp-content/uploads> (Accessed on July 27, 2021).
7. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kolchin P.V., Kiselev A.V. Diagnostics of 3D printing on a CNC machine by machine learning. Russian Engineering Research, 2021, vol. 41, no. 4, pp. 320–324.
8. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Sentyureva V.I. Problems of ensuring a safe operation of freight car bogies at negative temperatures. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2019, vol. 22, no. 4, pp. 18–26. DOI: 10.22213 / 2413-1172-2019-4-18-26
9. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. Evaluation of the mechanism of the destruction of metals based on approaches of artificial intelligence and fractal analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033076 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/709/3/033076
10. Poletaev Yu.V., Poletaev V.Yu. Single-pass electric arc welding under a thin layer of slag of thick-sheet structures of 09G2S steel. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univetsiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.)
11. Uzlov I.G., Babchenko A.I., Dementyeva Zh.A., Kononenko A.A., Safronov A.L. Influence of microstructure parameters of wheel steel on its ductility properties.

Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: sb. nauch. tr. [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of research papers]. Dnipropetrovsk: IFM NAS of Ukraine, 2007, no. 14, pp. 202–210. (In Russ.)

12. Toporov G.V., Smokotin G.Ya. Influence of a grain size on impact-fatigue resistance of steel 45. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic Institute], 1958, vol. 106: Drilling machines, pp. 153–164. (In Russ.)

Поступила 23.08.2021; принята к публикации 07.10.2021; опубликована 24.12.2021
Submitted 23/08/2021; revised 07/10/2021; published 24/12/2021

Кабалдин Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

Рябов Дмитрий Александрович – аспирант, научный сотрудник, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X

Колчин Павел Владимирович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: posledny@mail.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Шатагин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: dmitsanych@gmail.com. ORCID 0000-0003-1293-4487

Киселев Андрей Викторович – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: andrey.ak93@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3710-1609

Yury G. Kabaldin – DrSc (Eng.), Professor, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

Dmitry A. Ryabov – postgraduate student, Researcher, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X

Pavel V. Kolchin – postgraduate student, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: posledny@mail.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Dmitry A. Shatagin – PhD (Eng.), Associate Professor, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: dmitsanych@gmail.com. ORCID 0000-0003-1293-4487

Andrey V. Kiselev – postgraduate student, Alexeev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: andrey.ak93@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3710-1609