

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

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

УДК 620.18

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-68-74



ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ 3D-ПЕЧАТИ

Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Чегуров М.К.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Год от года в производстве увеличивается доля аддитивных технологий. Наибольшими темпами растет применение 3D-печати электродуговой наплавкой, как наиболее экономичной и производительной технологии. Однако имеющихся научных и практических данных недостаточно для ее успешного использования при изготовлении деталей, работающих в условиях низких температур. В связи с этим требуется более детальное исследование материалов, полученных 3D-печатью и предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера и Арктики. **Используемые оборудование и методы.** Изготовление образцов из стали 07X25H13 выполнено на разработанном стенде, реализующем технологию 3D-печати электродуговой наплавкой, применен метод испытания на ударный изгиб по Шарпи, с использованием растрового электронного микроскопа проведен анализ фрактограмм изломов. **Новизна.** Определены механизмы разрушения при низких температурах образцов из стали 07X25H13, выполненных по технологии 3D-печати электродуговой наплавкой. Полученные результаты позволяют понять поведение материалов, напечатанных объектов в условиях низких температур, чему ранее уделялось недостаточно внимания. Выявлена связь фрактальной размерности изломов образцов и величины ударной вязкости, позволяющая оценивать влияние температуры на разрушение. **Результат.** В процессе исследования образцов, изготовленных из стали 07X25H13, установлено, что изломы, полученные после испытаний на ударную вязкость, обладают четырьмя характерными зонами: зарождения трещины; распространения трещины, утяжки, долома. Во всем исследуемом температурном диапазоне наблюдается вязкий механизм разрушения, однако с уменьшением температуры испытаний происходит снижение пластичности и уменьшение количества наблюдаемых зон. Показана связь уменьшения фрактальной размерности изображений изломов с уменьшением ударной вязкости. **Практическая значимость.** Полученные результаты дают возможность более полно понять механизмы разрушения объектов из стали 07X25H13, полученных с помощью 3D-печати электродуговой наплавкой и оценить поведение данного материала в условиях низких температур. Установленная связь фрактальной размерности излома и ударной вязкости позволяет более четко устанавливать температурные причины разрушения конструкций.

Ключевые слова: конструкционные стали, 3D-печать, электродуговая наплавка, фрактографический анализ, фрактальная размерность, хладостойкость.

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

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

Для цитирования

Электронно-микроскопические исследования механизмов разрушения конструкционных сталей, полученных на основе 3D-печати / Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Чегуров М.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 68–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-68-74>



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

ELECTRON MICROSCOPY STUDIES ON THE FRACTURE MECHANISMS OF STRUCTURAL STEELS FABRICATED BY 3D PRINTING

Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Chegurov M.K.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). From year to year, the share of additive technologies in production keeps increasing. The highest rate of growth is attributed to the use of wire and arc additive manufacturing for 3D printing as the most feasible and efficient technology. However, the available scientific and practical data are insufficient for its successful use in manufacturing parts operating at low temperatures. In this regard, it is required to carry out a more detailed study of materials produced by 3D printing and intended for operation in the Far North and the Arctic. **Equipment and Methods Applied.** The specimens from steel grade 07Kh25N13 were produced on the developed stand, implementing wire and arc additive manufacturing for 3D printing; the Charpy impact test method was applied, fractographs were analyzed using a scanning electron microscope. **Originality.** The authors determined fracture mechanisms at low temperatures applied for the specimens from steel grade 07Kh25N13 made by wire and arc additive manufacturing for 3D printing. The results obtained allow us to understand the behavior of materials and printed objects at low temperatures, which has not received enough attention previously. The authors revealed the relationship between the fractal dimension of the specimen fractures and impact toughness to estimate the effect of temperature on fracture. **Result.** The studies on the specimens from steel grade 07Kh25N13 showed that the fractures occurred after impact testing had four characteristic zones: crack initiation; propagation of cracks, tightening, and a break zone. A total temperature range under study showed a ductile fracture mechanism; however, with a decrease in test temperature, there is a decrease in plasticity and a decrease in the number of observed zones. The paper describes the relationship between a decrease in the fractal dimension of fracture images and a decrease in impact toughness. **Practical Relevance.** The results contribute to a more detailed understanding of the fracture mechanisms of the specimens from steel grade 07Kh25N13 produced by wire and arc additive manufacturing for 3D printing and assessment of the behavior of this material at low temperatures. The established relationship between the fractal dimension of the fracture and impact toughness allows us to more clearly establish the temperature reasons for the destruction of structures.

Keywords: structural steels, 3D printing, wire and arc additive manufacturing, fractographic analysis, fractal dimension, cold resistance.

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

For citation

Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Chegurov M.K. Electron Microscopy Studies on the Fracture Mechanisms of Structural Steels Fabricated by 3D Printing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 68–74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-68-74>

Введение

Освоение северных регионов Российской Федерации, Арктики входит в число приоритетных задач Правительства РФ. Однако активное освоение данных регионов сдерживается недостаточной надежностью механизмов и конструкций при пониженных температурах, которые требуют периодической или оперативной замены. Обеспечение надежности механизмов и конструкций обеспечивается, прежде всего, правильным выбором материала для изготовления деталей. Известно, что при понижении температуры эксплуатации механизмы разрушения металлов, особенно с ОЦК-решеткой, значительно меняются. Это при определенных условиях может привести к мгновенному хрупкому разру-

шению ответственных элементов конструкции, что недопустимо.

В настоящее время все большее количество деталей механизмов и конструкций получают с использованием технологии 3D-печати металлами. Немаловажным является применение данных подходов для изготовления деталей северного исполнения. Наиболее универсальной и динамично развивающейся технологией 3D-печати хладостойкими металлами является электродуговая наплавка [1]. 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, 3].

Поэтому необходимо подробно исследовать механизмы разрушения при низких температурах металлов, полученных на основе 3D-печати, чтобы иметь лучшее представление, как материал ведет себя с понижением температуры, как влияет снижение пластичности и увеличивающаяся хрупкая составляющая в изломе на поведение образцов и конструкций. Несмотря на появление ряда публикаций по изучению особенностей структуры и свойств металлов, полученных на основе технологии 3D-печати, подобных исследований, проведенных в работе, на данный момент нет [4–7].

Материалы и методы исследования

В работе исследована сталь 07X25H13, обладающая хорошей коррозионной стойкостью и хладостойкостью, в связи с чем широко используемая для изготовления элементов конструкций, функционирующих в условиях пониженных температур.

Заготовки образцов из исследуемого материала были получены с использованием технологии 3D-печати электродуговой наплавкой на разработанном стенде, представленном на **рис. 1**.



Рис. 1. Стенд для 3D-печати электродуговой наплавкой

Fig. 1. Stand for wire and arc additive manufacturing for 3D printing

3D-печать выполнялась проволокой диаметром 0,8 мм в защитной атмосфере, Ar – 98% и CO₂ – 2%. Режимы 3D-печати были определены системой управления стендом исходя из условий стабильности процесса на основе способа [8], и приняли значения: сила сварочного тока 195 А, напряжение 24 В, скорость печати 400 мм/мин. В

процессе формирования заготовки выдерживался термический цикл, при котором температура слоя, по которому велась печать, выдерживалась в диапазоне 300–350°C, исходя из рекомендаций к подогреву металла [9].

Качество и стабильность структуры материала получаемых образцов обеспечивались за счет постоянной диагностики устойчивости динамической системы «источник питания – дуга – материал». После 3D-печати, с целью улучшения эксплуатационных характеристик, сталь 07X25H13 была подвергнута аустенизации (1050–1100°C, выдержка, охлаждение на воздухе).

Для оценки температуры вязкохрупкого перехода и механизмов разрушения металлов в широком диапазоне пониженных температур изготавливались образцы типа Шарпи (тип образца 13 по ГОСТ 9454) с сечением в зоне концентратора 5×8 мм.

Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре МК-30А в диапазоне температур –150...+20°C в соответствии с требованиями ГОСТ 9454. Охлаждение образцов до необходимой температуры осуществлялось в специально разработанной криокамере, показанной и описанной в литературе [10].

Фрактографический анализ проводился с применением растрового электронного микроскопа JSM-3U. Для определения температуры вязко-хрупкого перехода исследовались изломы образцов, испытанных при различных температурах. Определялось количество вязкой и хрупкой составляющих в изломе согласно ГОСТ Р ИСО 148-1-2013. За температуру вязкохрупкого перехода (T_{50}) принималась температура, при которой количество вязкой и хрупкой составляющей составляют 50% от площади излома.

В качестве количественного показателя изображения фрактограмм образцов использовался показатель фрактальной размерности D_F [11]. Для предварительной обработки изображений изломов и определения показателя фрактальной размерности изображения D_F была разработана программа в среде MATLAB [12].

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам испытаний образцов из стали 07X25H13, полученных на основе 3D-печати электродуговой наплавкой, получены значения ударной вязкости металла в диапазоне температур испытания. На электронном микроскопе получены изображения изломов металлов для исследуемых температур. Результаты оценки фрактальной размерности излома стали 07X25H13 и

зависимость ударной вязкости от температуры показаны на **рис. 2**.

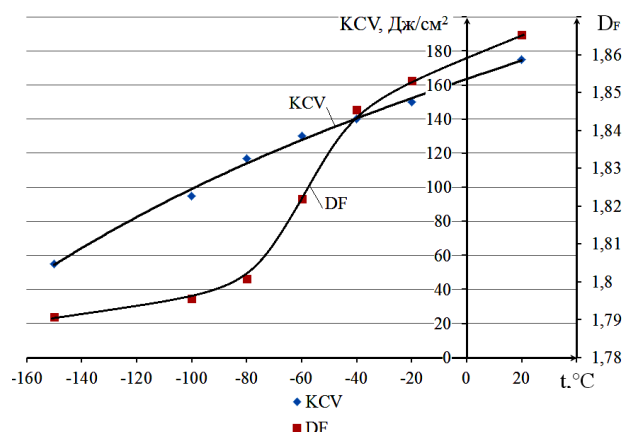


Рис. 2. Результаты оценки ударной вязкости и фрактального анализа (сталь 07X25H13)
Fig. 2. Impact strength assessment and fractal analysis (steel grade 07Kh25N13)

Из полученных зависимостей (см. **рис. 2**) видно, что с понижением температуры испытания наблюдается монотонное снижение ударной вязкости, однако во всем диапазоне исследуемых температур она остается на достаточно высоком уровне. Показатель фрактальной размерности изображения излома снижается с понижением температура, что объясняется изменением размера ямок вязкого разрушения и снижением пластичности исследуемого материала. Таким образом, между значениями ударной вязкости и фрактальной размерностью изображения излома имеется определенная связь.

Общий вид изломов образцов стали 07X25H13 при различных температурах показан на **рис. 3** с выделением отдельных зон в изломе.

Очаг разрушения обнаружен на образце, который испытали при комнатной температуре

($T_{\text{исп}} = +20^\circ\text{C}$), также на данном изломе характерно наличие четырех зон разрушения. У образцов, испытанных при пониженной температуре, наблюдается только неровность в поверхности излома, а зоны зарождения и распространения трещины не ярко выражены, утяжек на боковой поверхности излома не обнаружено. Для детального исследования механизмов разрушения стали при разных температурах проведены электронно-микроскопические исследования в трех зонах (зарождения трещины, распространения трещины и долома) образца.

Электронные фотографии изломов в зоне зарождения трещины показаны на **рис. 4**.

Как показывает анализ изломов, в зоне распространения трещины при комнатной температуре (**рис. 4, а**) наблюдаются ямки отрыва, а при пониженных температурах (**рис. 4, б, в**) – ямки сдвига, характеризующие вязкое разрушение.

Электронные фотографии изломов в зоне распространения трещины показаны на **рис. 5**.

В зоне распространения трещин во всем исследуемом диапазоне температур наблюдается полностью вязкий излом (ямки отрыва). При понижении температуры наблюдается уменьшение размера ямок, особенно при температуре -150°C (**рис. 5, в**), что характеризует снижение пластичности исследуемого материала, которое подтверждается результатами испытаний на растяжение (см. **таблицу**).

Электронные фотографии зон долома образцов имеют аналогичный характер, как показано в зоне распространения трещины (см. **рис. 5**).

Все образцы, независимо от температуры испытания, имеют вязкий характер разрушения (совокупность ямок различной конфигурации), следовательно, исследуемая сталь не имеет температуры вязкохрупкого перехода в рассматриваемом диапазоне температур.

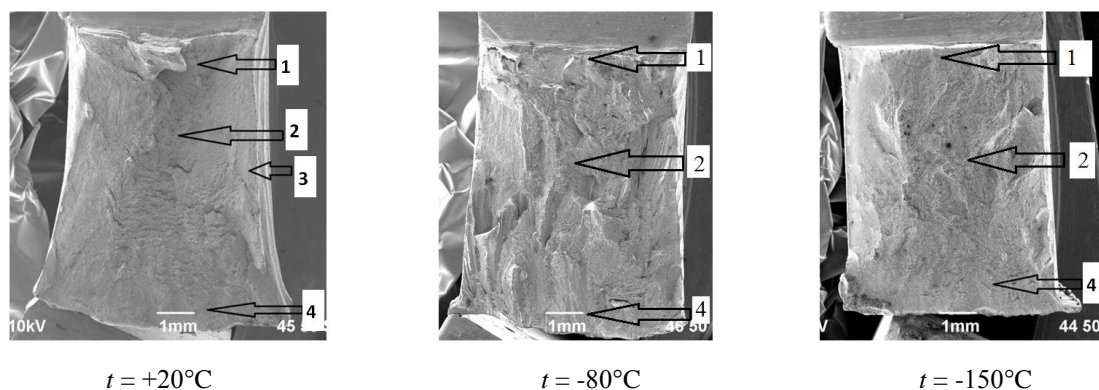


Рис. 3. Поверхности изломов образцов после испытания на ударную вязкость при различных температурах:
1 – зона зарождения трещины; 2 – зона распространения трещины; 3 – утяжки; 4 – зона долома
Fig. 3. Fracture surfaces of the specimens after impact toughness testing at different temperatures:
1 is a crack initiation zone; 2 is a crack propagation zone; 3 is a tightening zone; 4 is a break zone

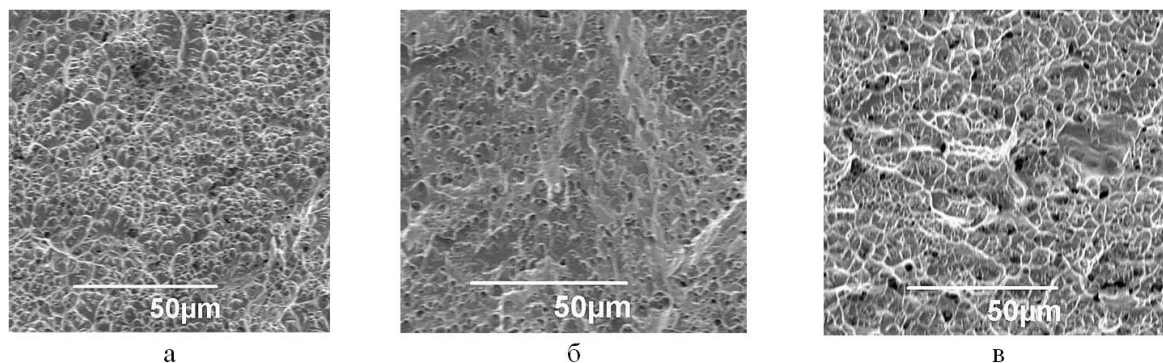


Рис. 4. Излом в зоне зарождения трещин (верхней части образцов) при температурах: а – $t = +20^{\circ}\text{C}$; б – $t = -80^{\circ}\text{C}$; в – $t = -150^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Fracture in the crack initiation zone (an upper part of the specimens) at temperatures: а is $t = +20^{\circ}\text{C}$; б is $t = -80^{\circ}\text{C}$; в is $t = -150^{\circ}\text{C}$

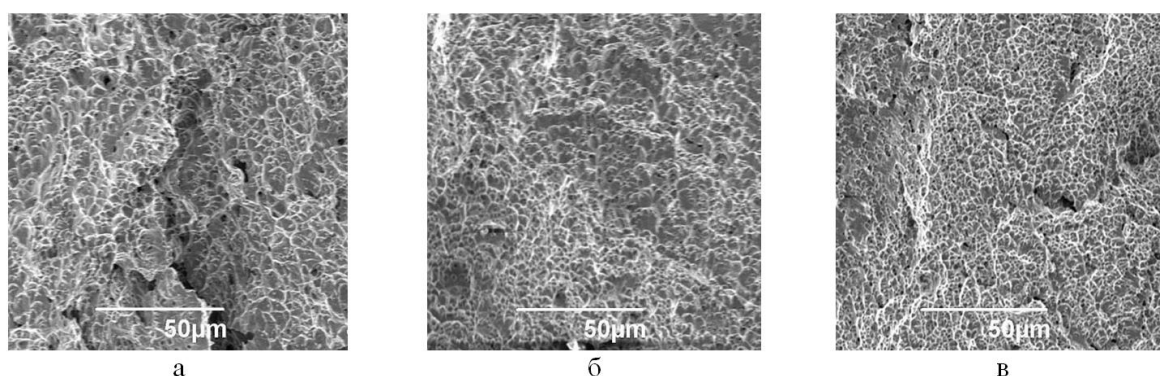


Рис. 5. Излом в зоне распространения трещин (середина образцов) при температурах: а – $t = +20^{\circ}\text{C}$; б – $t = -80^{\circ}\text{C}$; в – $t = -150^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Fracture in the crack propagation zone (the middle of the specimens) at temperatures: а is $t = +20^{\circ}\text{C}$; б is $t = -80^{\circ}\text{C}$; в is $t = -150^{\circ}\text{C}$

Таблица. Механические свойства стали 07X25H13
T a b l e . Mechanical properties of steel grade 07Kh25N13

Материал	$t, ^{\circ}\text{C}$	Механические свойства			
		$\delta, \%$	$\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}/\sigma_{0.2}$
07X25H13	+20	32	329	521	1,58
	-40	24	389	596	1,53
	-80	15	447	675	1,51
	-150	12	526	782	1,49

Закключение

На основании выполненной работы установлена связь фрактальной размерности излома образца, полученного путем 3D-печати, со значениями ударной вязкости стали 07X25H13. Показатель фрактальной размерности изображения излома снижается с понижением температуры, что объясняется изменением размера ямок вязкого разрушения и снижением пластичности исследуемого материала.

Очаг разрушения обнаружен на образце, который испытывали при комнатной температуре ($t = +20^{\circ}\text{C}$), также на данном изломе характерно наличие четырех зон разрушения. При понижении температуры испытания стали 07X25H13 сохраняется вязкая составляющая в изломе образцов, следовательно, исследуемая сталь не имеет температуры вязкохрупкого перехода в рассматриваемом диапазоне температур.

Список литературы

1. Oliveira J.P., Rodrigues Tiago, Duarte Valdemar, Miranda R.M., Santos Telmo. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Materials. 2019. 12(7):1121. doi: 10.3390/ma12071121
2. Елистратова А.А., Коршакевич И.С. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Том 1. С. 557–559.
3. Mendagaliyev R., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zotov O.G., Ereemeev A.D. Microstructure and

- Mechanical Properties of Laser Metal Deposited Cold-Resistant Steel for Arctic Application. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 36, pp. 249–255. ISSN 2351-9789. doi: 10.1016/j.promfg.2019.08.032
- Анализ структуры и механических свойств сплава Co–Cr–Mo, полученного методом 3D-печати / Казанцева Н.В., Ежов И.В., Давыдов Д.И., Меркушев А.Г. // *Физика металлов и металловедение*. 2019. 120 (12). С. 1271–1278. doi: 10.1134/S0015323019120088
 - Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати / Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Ананьин С.В., Белоplotов С.В. // *Ползуновский вестник*. 2016. № 2. С. 61–64.
 - Смирнова Е.А., Герман М.А., Фисенкова Д.В. Структура и свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных при помощи 3D-технологии прямого нанесения металла // *Гагаринские чтения – 2019: сборник тезисов докладов XIV Международной молодежной научной конференции*. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. 924 с.
 - Xu X., Ganguly S., Ding J., Guo S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process. *Mater. Charact.* 2017. 143. Pp. 152–162. doi:10.1016/j.matchar.2017.12.002.
 - Пат. 2696121 Российская Федерация, МПК B33Y10/00 B22F3/00. Способ 3D-печати на оборудовании с ЧПУ с интеллектуальной оптимизацией режимов / Ю.Г. Кабалдин, П.В. Колчин, Д.А. Шатагин, А.В. Киселев; заявитель и патентообладатель НГТУ им. Р.Е. Алексеева. № 2018125837; заявл. 13.07.2018; опубл. 31.07.2019.
 - РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования (РТМ-1с). Введ. 2001-07-02. М., 2002. 465 с.
 - Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Зиновьев Ю.А. Исследование хладостойкости материалов для ответственных узлов технических средств, работающих при низких температурах // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2016. Т. 4. № 2. С. 14–17.
 - Савенков Г.Г., Барахтин Б.К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // *ПМТФ*. 2011. Т. 52. №6. С. 177–184.
 - Kabaldin Y.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.
 - (WAAM). *Materials*. 2019. 12(7):1121. doi: 10.3390/ma12071121
 - Elistratova A.A., Korshakevich I.S. 3D printing technologies: advantages and disadvantages. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Currently Important Issues of Aviation and Cosmonautics], 2015, vol. 1, pp. 557–559. (In Russ.)
 - Mendagaliyev R., Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Zotov O.G., Ereemeev A.D. Microstructure and mechanical properties of laser metal deposited cold-resistant steel for Arctic application. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 36, pp. 249–255. ISSN 2351-9789. doi: 10.1016/j.promfg.2019.08.032
 - Kazantseva N.V., Ezhov I.V., Davydov D.I., Merkushev A.G. Analysis of the structure and mechanical properties of the Co–Cr–Mo alloy obtained by 3D printing. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metal Science], 2019, 120 (12), pp. 1271–1278. doi:10.1134/S0015323019120088
 - Balashov A.V., Cherdantsev A.O., Novikovskiy E.A., Ananin S.V., Beloplotov S.V. Study on strength of the products manufactured by 3D printing. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovskiy Bulletin], 2016, no. 2, pp. 61–64. (In Russ.)
 - Smirnova E.A., German M.A., Fisenkova D.V. Structure and properties of samples from titanium alloy Ti-6Al-4V, fabricated by 3D technology of direct metal deposition. *Gagarinskie chteniya – 2019. Sbornik tezisev dokladov XIV Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Gagarin Readings – 2019. Book of abstracts of the 14th International Youth Scientific Conference]. Moscow Aviation Institute (National Research University), 2019, 924 p. (In Russ.)
 - Xu X., Ganguly S., Ding J., Guo S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process. *Mater. Charact.* 2017, 143, pp. 152–162. doi:10.1016/j.matchar.2017.12.002.
 - Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V. *Sposob 3D pechati na oborudovanii s ChPU s intellektualnoy optimizatsiey rezhimov* [Method of 3D printing on CNC equipment with intelligent optimization of modes]. Patent RF, no. 2696121, 2019.
 - Guiding Document RD 153-34.1-003-01. Welding, heat treatment and control of pipe systems of boilers and pipelines during the installation and repair of a power plant (PTM-1c). Introduced on 02.07.2001. Moscow, 2002, 465 p.
 - Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Zinoviev Yu.A. Study on cold resistance of materials for critical components of facilities operating at low temperatures. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal], 2016, vol. 4, no. 2, pp. 14–17. (In Russ.)
 - Savenkov G.G., Barakhtin B.K. Relationship between the fractal dimension of the fracture surface and a set of standard tensile characteristics of the material. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics], 2011, vol. 52, no. 6, pp. 177–184. (In Russ.)

References

- Oliveira J.P., Rodrigues Tiago, Duarte Valdemar, Miranda R.M., Santos Telmo. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing

12. Kabaldin Y.G., Anosov M.S., Shatagin D.A. and fractal analysis. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020) 033076 IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/709/3/033076.

Поступила 30.03.2021; принята к публикации 26.05.2021; опубликована 27.09.2021
Submitted 30/03/2021; revised 26/05/2021; published 27/09/2021

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

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

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

Чегуров Михаил Константинович – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: mkchegurov@mail.ru. ORCID 0000-0001-5408-1887

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

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

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

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

Mikhail K. Chegurov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: mkchegurov@mail.ru. ORCID 0000-0001-5408-1887