



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

УДК 620.17

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТАЛИ Св-09Г2С, ПОЛУЧЕННОЙ 3D-ПЕЧАТЬЮ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А.

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

Аннотация. Интенсивное развитие технологии аддитивного выращивания материалов, которые существенно отличаются от классических материалов по структуре и свойствам, требует изучения характера изменения информативных параметров структурной деградации данных групп сплавов для обеспечения их неразрушающего контроля при эксплуатации. В работе проведено исследование накопления структурных повреждений при усталостном нагружении стали 09Г2С, полученной на основе технологии WAAM с использованием комбинации неразрушающих методов контроля (физическая акустика, магнитный контроль, оптические исследования). В качестве информативных характеристик предложены такие показатели, как фрактальная размерность микроструктуры в рабочей зоне (D_F), акустический параметр (D), а также коэрцитивная сила (H_c). Показано, что в процессе усталостного нагружения в отдельных зернах материала уже на начальном этапе нагружения наблюдается появление большого количества полос скольжения с последующим увеличением как их количества, так и толщины. Установлено, что полученные зависимости характеристик неразрушающего контроля имеют определенную корреляцию и отражают структурные изменения в материале. Так, в процессе усталостного нагружения на этапе до образования макротрещины наблюдается монотонное уменьшение показателя фрактальной размерности микроструктуры и акустического параметра, а также увеличение коэрцитивной силы. После образования макротрещины характер зависимости указанных характеристик изменяется и наблюдается незначительное увеличение акустического параметра и снижение коэрцитивной силы до начальных значений. Установленные зависимости информативных параметров неразрушающих методов контроля позволяют однозначно судить о стадии разрушения материала и его остаточном ресурсе и могут быть использованы для диагностики материалов в процессе их испытаний и при эксплуатации.

Ключевые слова: 3D-печать, технология WAAM, усталостное нагружение, фрактальный анализ, неразрушающий контроль

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00095 «Разработка научно-технологических основ структурообразования конструкционных материалов, полученных путем аддитивного электродугового выращивания для формирования механических свойств при усталости с использованием подходов искусственного интеллекта».

© Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А., 2023

Для цитирования

Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали Св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой / Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 47-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53>



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

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE ACCUMULATION OF FATIGUE DAMAGE IN STEEL Sv-09G2S PRODUCED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Anosov M.S., Ryabov D.A., Chernigin M.A., Solovyov A.A.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The rapid development of the technology of wire arc additive manufacturing of materials that differ significantly from conventional materials in their structure and properties entails studying the nature of changes in the informative parameters of the structural degradation of these groups of alloys to ensure their non-destructive testing during operation. The paper describes the studies on the accumulation of structural damage under fatigue loading of steel 09G2S produced by WAAM technology, using a combination of non-destructive testing methods (physical acoustics, magnetic particle inspection, optical studies). The proposed informative characteristics include such parameters as the fractal dimension of the microstructure in the operating area (D_F), the acoustic parameter (D), and coercive force (H_c). It is shown that during fatigue loading individual grains of the material show a large number of slip bands and a subsequent increase in both their number and thickness already at the starting stage of loading. It has been established that the obtained relationships of the non-destructive testing characteristics have a certain correlation and reflect structural changes in the material. Thus, during the fatigue loading process, before the macrocrack formation, there is a monotonic decrease in the fractal dimension of the microstructure and the acoustic parameter, as well as an increase in coercive force. After the macrocrack formation the nature of the relationship between these characteristics changes and there is a slight increase in the acoustic parameter and a decrease in coercive force to the initial values. The established relationships of the informative parameters of non-destructive testing methods contribute to shaping an unambiguous opinion about the stage of fracture of the material and its residual life and may be used to diagnose materials during their testing and operation.

Keywords: 3D printing, WAAM technology, fatigue loading, fractal analysis, non-destructive testing

The study was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-00095 “Developing a scientific and technological framework for the structure formation of structural materials produced by wire arc additive manufacturing to form mechanical properties during fatigue, using artificial intelligence approaches”.

For citation

Anosov M.S., Ryabov D.A., Chernigin M.A., Solovyov A.A. Non-Destructive Testing of the Accumulation of Fatigue Damage in Steel Sv-09G2S Produced by Wire Arc Additive Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 47-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53>

Введение

Интенсивное развитие современных технологий 3D-печати и их замещение классических способов получения деталей машин обуславливает разработку инструментов оценки их долговечности в процессе эксплуатации. Наиболее производительным и простым с точки зрения реализации является метод 3D-печати электродуговой наплавкой (WAAM) [1-3]. Сам процесс электродуговой наплавки – сложный процесс, зависящий прежде всего от режимов печати и параметров термического цикла, при этом микроструктура получаемого материала существенно отличается от структуры материала, полученного из проката. Разработанные критерии накопления структурных повреждений для материалов, полученных путем механической обработки из проката, для материалов, полученных

наплавкой, будут не актуальны, что связано в том числе и со значительной анизотропией таких материалов. Это, в свою очередь, требует получения базы информативных параметров, определяющих степень структурных повреждений в материале, полученном по технологии WAAM.

Наиболее интересным с точки зрения изучения накопления структурных повреждений является процесс усталостного нагружения материала. Это связано с тем, что большое количество деталей механизмов и конструкций работают в условиях усталостных нагрузок [4] и, как показывает статистика, около 80% поломок и аварий связаны с усталостным характером их нагружения [5].

Зарождение и развитие трещин при усталостном нагружении начинается, прежде всего, в поверхностном слое деталей [6]. Как показали проведенные ранее исследования, одним из эффективных инструментов оценки структурных изме-

нений в поверхностном слое детали является фрактальный анализ эволюции микроструктуры [7, 8], позволяющий проводить количественную оценку процессов деградации структуры металла.

Для повышения точности оценки структурной поврежденности материала необходимо использование комбинированных методов неразрушающего контроля. Сравнительный анализ современных методов неразрушающего контроля показывает, что к числу наиболее перспективных методов контроля структурного состояния материала на стадиях эксплуатации до появления макродефектов относятся методы физической акустики, а также магнитный метод контроля и диагностики материала.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка накопления усталостных повреждений в стали Св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой с использованием комбинации методов неразрушающего контроля.

Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследования выступает сталь 09Г2С, наиболее широко используемая для изготовления заготовок методом электродуговой наплавкой. Химический состав стали Св-09Г2С, %: С – 0,09; Si – 0,9; Mn – 1,9; Ni – 0,12; S – 0,008; P – 0,12; Cr – 0,14; Cu – 0,09; Fe – основа.

Образцы для испытания материала на растяжение и усталость изготавливались на специализированном стенде для аддитивной электродуговой наплавки [4]. Вырезка образцов из полученной заготовки в виде напавленной стенки толщиной порядка 10 мм осуществлялась вдоль и поперек относительно направления наплавки для оценки анизотропии механических свойств материала.

Для испытаний на растяжение изготавливались образцы в соответствии с требованиями ГОСТ 11150 с рабочим сечением 5×10 мм. Растяжение образцов проводили на разрывной силовой машине Tinius Olsen H100KU при скорости нагружения 10 мм/с.

Испытания образцов на усталость проводили по схеме консольного изгиба на образцах толщиной 3 мм и размером рабочей зоны 60×15 мм (тип IV) по ГОСТ 25.502 на частоте 8,3 Гц. Испытания проводили с учетом требований ГОСТ 25.502-79.

Оптические исследования материала в рабочей зоне проводили на микроскопе KYENCE-VHX 1000. Для предварительной обработки и оценки фрактальной размерности изображений микроструктур (D_F) и структурной поврежденности была использована специализированная программа (Свидетельство №2022666922 «Програм-

ма для оценки показателей микроструктуры и структурной поврежденности материалов»).

Для акустических измерений применяли измерительно-вычислительный акустический комплекс АИС НРК-3 [9]. Номинальная частота датчиков 5 МГц. В качестве информативного параметра в данном случае использовался безразмерный параметр D , определяемый по формуле

$$D = \frac{c_1 + c_2}{c_3},$$

где c_1 и c_2 – скорости распространения сдвиговых упругих волн с поляризацией (направлением колебания отдельных частиц) вдоль оси образца и поперек оси соответственно; c_3 – скорость распространения (задержка) продольной упругой волны.

Для оценки магнитных характеристик использовался магнитный анализатор металлов – коэрцитиметр МА-412ММ. В качестве магнитных характеристик оценивались: остаточная намагниченность B_r , коэрцитивная сила H_c , отношение H_c/B_r .

Оценку микротвердости материала проводили, используя микротвердомер ИТВ-1-АМ при нагрузке 1 кгс. На каждом этапе было проведено не менее 5-ти измерений (акустических, магнитных характеристик, микротвердости) с последующей статистической обработкой полученных данных.

Результаты испытаний и их обсуждение

По результатам испытаний на растяжение определены значения механических характеристик стали 09Г2С, полученной наплавкой в широком диапазоне пониженных температур испытания. Предел прочности сплава составил порядка $\sigma_b = 510$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 365$ МПа, а относительное удлинение $\delta = 28\%$, что соизмеримо с характеристиками сплава 09Г2С, полученного из проката.

В соответствии с результатами испытаний на растяжение испытания на усталость проводили при амплитудах напряжений в цикле от 300 до 435 МПа. По результатам испытаний образцов на усталость построены кривые усталости для широкого диапазона амплитуд напряжений. При этом установлено незначительное (не выше 20%) увеличение долговечности образцов, полученных в продольном направлении относительно наплавки по сравнению с поперечными образцами.

Процесс эволюции структуры стали 09Г2С в рабочем сечении и в отдельном наиболее благоприятно расположенном зерне относительно направления нагружения показан на **рис. 1**.

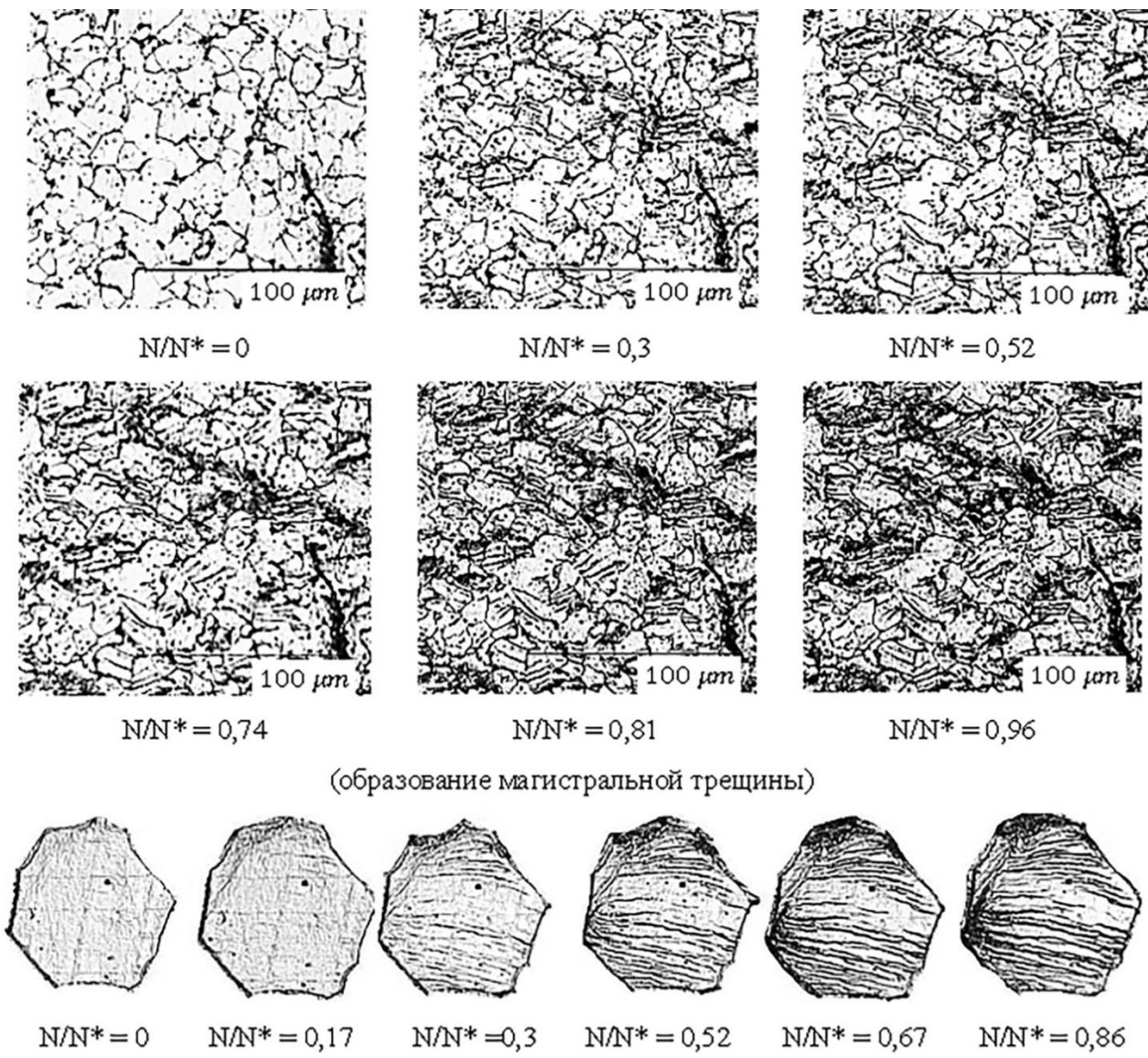


Рис. 1. Структурные изменения в процессе усталостного нагружения в рабочем сечении (сверху) и в отдельном наиболее благоприятно расположенном зерне (снизу) при различной наработке образца (N/N*)
 Fig. 1. Structural changes during fatigue loading in the test section (at the top) and in an individual, the most favorably located grain (on the bottom) at various running time of the sample (N/N*)

Анализ **рис. 1** показывает, что в процессе усталостного нагружения уже на начальном этапе наблюдается появление большого количества устойчивых полос скольжения в отдельных зернах феррита в виде тонких линий. В процессе дальнейшего усталостного нагружения наблюдается увеличение концентрации полос скольжения и их ширины, а образование магистральной трещины наблюдалось в местах их наибольшей концентрации. В 80% зерен на этапе предразрушения обнаруживаются значительные структурные изменения. Данный характер структурных изменений наблюдается и при других амплитудах напряжений в цикле и аналогичен особенностям структур-

ного изменения для низкоуглеродистых сталей, полученных классическими методами [10].
 Анализ микротвердости (HV) (**рис. 2**) в рабочей зоне образца показывает, что на начальном этапе нагружения (до 30% от N*) микротвердость практически не изменяется, после чего наблюдается разупрочнение материала и снижение твердости с 157 HV до 148 HV, что связано с изменением полей внутренних напряжений и переходом напряженно-деформированного состояния зоны контроля в область растягивающих напряжений. После появления магистральной трещины в рабочей зоне наблюдается рост микротвердости, вплоть до значений 167 HV.

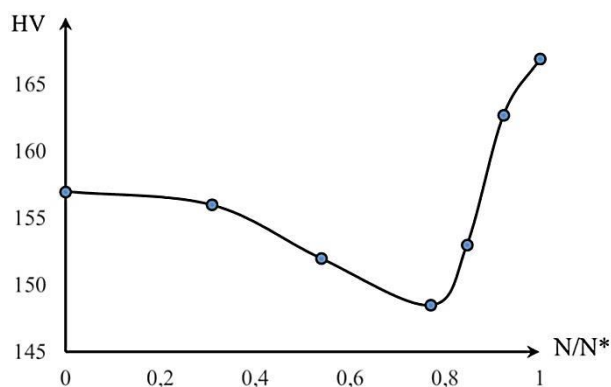


Рис. 2. Значения микротвердости HV в рабочей зоне образца при различной наработке образца N/N^* ($\sigma_{max} = 350$ МПа)

Fig. 2. Microhardness, HV, in an operating area of the sample at various running time of the sample N/N^* ($\sigma_{max} = 350$ MPa)

Процесс структурных изменений оказывает значительное влияние на показатель фрактальной размерности D_F изображения микроструктуры рабочей зоны сплава (рис. 3). Фактически при расчете фрактальной размерности ведется учет светлых участков микроструктуры (зерен феррита без значительных изменений и полос скольжения) и темных участков (полос скольжения, границ зерна и т.д.).

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что характер изменения фрактальной размерности микроструктуры рабочей зоны образца носит линейный характер на участке до появления магистральной трещины при достижении наработки порядка 0,82-0,9, после чего структурные изменения в рабочей зоне происходят наиболее интенсивно. Данный характер зависимостей наблюдается во всем диапазоне малоциклового усталостного нагружения образцов.

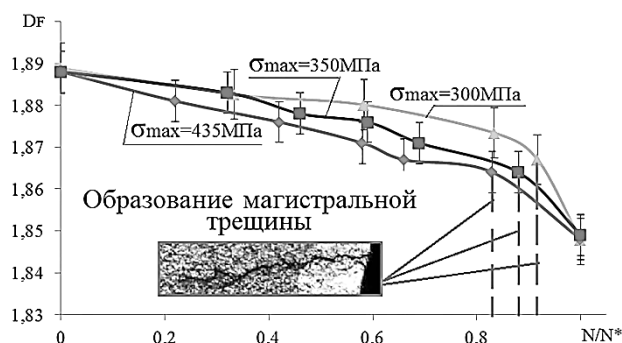


Рис. 3. Зависимости фрактальной размерности микроструктуры D_F от наработки N/N^* для стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати электродуговой наплавкой

Fig. 3. Relationship between fractal dimension D_F and running time N/N^* for steel 09G2A produced by wire arc additive manufacturing

При исследовании особенностей изменения параметров ультразвуковых волн (поверхностной, продольной и поперечной) установлено, что наиболее информативной является закономерность изменения акустического параметра D . Исследование данного параметра проводили до момента появления магистральной трещины. Полученные зависимости акустического параметра D от наработки образца при исследуемых амплитудах напряжений показаны на рис. 4.

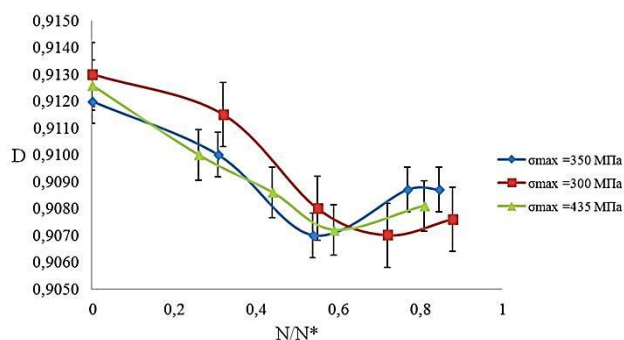


Рис. 4. Зависимость акустического параметра D от наработки образца (N/N^*) для стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати электродуговой наплавкой при различных амплитудах напряжений

Fig. 4. Relationship between acoustic parameter D and running time (N/N^*) for steel 09G2A produced by wire arc additive manufacturing at various ranges of stress

Анализ изменения акустического параметра показывает, что при наработке стали 09Г2С до 0,6, наблюдается монотонное снижение параметра D , что связано с явлением деформационного наклепа и накоплением значительного количества дефектов. Точку на графике (см. рис. 4), в которой происходит изменение характера кривой в сторону увеличения значений показателя D , следует считать началом развития системы трещин (см. рис. 1). Следует отметить, что точка изменения характера кривой смещается в сторону увеличения наработки N/N^* при снижении интенсивности напряжений в зоне деформирования, что согласуется с общей теорией усталостного разрушения материалов.

На рис. 5 показаны зависимости изменения магнитных характеристик для стали 09Г2С в процессе усталостного нагружения.

В целом зависимости коэрцитивной силы H_c и ее отношения к остаточной намагниченности (H_c/B_r) коррелируют между собой и с изменением акустического параметра. Характер зависимости практически не изменяется при изменении амплитуды напряжений. Так, при наработке ста-

ли до 0,6 наблюдается монотонное увеличение магнитных характеристик с последующим уменьшением до исходных значений на стадии перед образованием магистральной трещины.

Учет всех выявленных информативных показателей в комплексе позволит с большой долей вероятности выявить стадию деградации и разрушения материала и его остаточный ресурс.

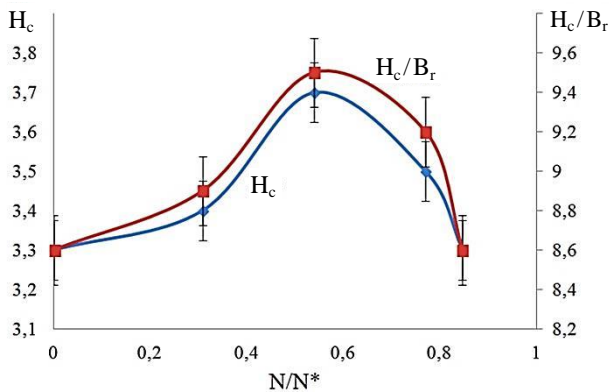


Рис. 5. Зависимость магнитных характеристик от наработки образца (N/N^*) для стали 09Г2С, полученной на основе 3D-печати электродуговой наплавкой при различных амплитудах напряжений

Fig. 5. Relationship between magnetic characteristics and running time (N/N^*) for steel 09G2A produced by wire arc additive manufacturing at various ranges of stress

Заклучение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Процесс усталостного разрушения стали 09Г2С, полученной путем аддитивной электродуговой наплавки по технологии WAAM, связан со структурной деградацией и накоплением дефектов в виде деформационных полос скольжения вплоть до появления магистральной трещины.

2. Усталостные свойства напечатанного металлического материала в объеме одной заготовки различны и, в первую очередь, зависят от направления вырезки образцов. При этом установлено, что все механические свойства (включая усталостные) напечатанной стали 09Г2С в продольном направлении (относительно направления наплавки) до 10% выше, чем у поперечных образцов.

3. Контроль текущего состояния исследуемого материала и степени наработки может быть осуществлен способами неразрушающего контроля, включая цифровой анализ микроструктуры и определение показателя D_F , а также средствами ультразвукового (через параметр D) и магнитного методов.

4. Полученные в рамках работы результаты могут быть применены для контроля ресурса реальных конструкций, изготовленных по технологии WAAM из стали 09Г2С.

Список источников

1. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study / Jackson M.A., Van Asten A., Morrow J.D. et al. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2018, vol. 5(4), pp. 459-466. DOI: 10.1007/s40684-018-0049-y
2. Pinto-Lopera J.E., S.T. Motta J.M., Absi Alfaro S.C. Real-Time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Processes // Sensors (Basel, Switzerland). 2016, vol. 16(9), pp. 1500. DOI: 10.3390/s16091500
3. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing / Li J., Alkahari M.R., Rosli N.A. et al. // International Journal of Automation Technology. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
4. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов / Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской акад. наук. М.: Наука, 2015. 484 с.
5. Леденёв В.В., Скрылёв В.И. Аварии, разрушения и повреждения. Причины, последствия и предупреждения: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. 440 с.
6. Чернявский А.О. Развитие поверхностных систем трещин при механической нагрузке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2003. №4. С. 78-82.
7. Исследование влияния режимов 3D-печати на структуру и хладостойкость стали 08Г2С / Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, Д.А. Рябов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 64-70. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70
8. Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands / Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A. et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2021, vol. 45, no. 1, pp. 101-102. DOI: 10.1111/ffe.13586
9. Разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля для измерения параметров упругих волн в металлических материалах / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.В. Желонкин и др. // Интеллектуальная электротехника. 2021. №4 (16). С. 101-114.
10. Гончар А.В., Мишакин В.В. Исследование процесса усталостного разрушения низкоуглеродистой стали 15ЮТА неразрушающими методами контроля // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. №3(90). С. 235-243.

References

1. Jackson M.A., Van Asten A., Morrow J.D. et al. Energy consumption model for additive-subtractive manufacturing processes with case study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2018;5(4):459-466. DOI: 10.1007/s40684-018-0049-y
2. Pinto-Lopera J.E., S.T. Motta J.M., Absi Alfaro S.C. Real-time measurement of width and height of weld beads in GMAW processes. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2016;16(9):1500. DOI: 10.3390/s16091500
3. Li J., Alkahari M.R., Rosli N.A. et al. Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *International Journal of Automation Technology*. 2019;13(3):346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
4. Terentyev V.F., Korableva S.A. *Uсталост metallov* [Fatigue of metals]. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka, 2015, 484 p. (In Russ.)
5. Ledenev V.V., Skrylev V.I. *Avarii, razrusheniya i povrezhdeniya. Prichiny, posledstviya i preduprezhdeniya: monografiya* [Failures, fracture and damage. Causes, consequences and prevention: a monograph]. Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University, 2017, 440 p. (In Russ.)
6. Chernyavsky A.O. Development of surface systems of cracks under mechanical load. *Vestnik YuUrGU*. *Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics]. 2003;(4):78-82. (In Russ.)
7. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A. et al. Study on of the influence of 3D printing modes on the structure and cold resistance of steel 08G2S. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I.Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(4):64-70. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-64-70
8. Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A. et al. Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2021;45(1):101-102. DOI: 10.1111/ffe.13586
9. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Zhelonkin M.V. et al. Development of an automated measuring system of non-destructive testing for measuring the parameters of elastic waves in metallic materials. *Intellektualnaya elektrotehnika* [Smart Electrical Engineering]. 2021;(4(16)):101-114. (In Russ.)
10. Gonchar A.V., Mishakin V.V. Study on the fatigue failure process of low-carbon steel 15YuTA with non-destructive testing methods. *Trudy NGTU im. R.E.Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2011;(3):235-243. (In Russ.)

Поступила 02.03.2023; принята к публикации 10.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 02/03/2023; revised 10/04/2023; published 27/06/2023

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, 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. Алексева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X

Чернигин Михаил Алексеевич – аспирант, инженер, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия.
Email: honeybadger52@yandex.ru.

Соловьев Александр Александрович – магистр, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия.

Maksim 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

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

Mikhail A. Chernigin – postgraduate student, engineer, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: honeybadger52@yandex.ru.

Aleksandr A. Solovyov – master, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.