



УДК 621.791.927.5

DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-242-249

Оригинальная статья
Original article

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ WAAM, НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛЕЙ 08ХМФА И 30ХГСА

Ю. Г. Кабалдин, М. С. Аносов, Ю. С. Мордовина,
М. А. Чернигин[✉], Р. Ш. Мансуров

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Россия, 603022, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

[✉ honeybadger52@yandex.ru](mailto:honeybadger52@yandex.ru)

Аннотация. На данный момент вопросы, касающиеся усталостного разрушения изделий, полученных с использованием аддитивных методов, в литературе встречаются достаточно редко. Особенно, если усталостное разрушение происходит в присутствии дефектов различного рода. Актуальность обусловлена риском преждевременного разрушения деталей под циклическими нагрузками, особенно в ответственных конструкциях (авиация, энергетика), где метод электродуговой наплавки (WAAM) может обеспечить экономию времени изготовления на 40 – 60 %. В данном исследовании оценивается влияние технологических дефектов на усталостную прочность сталей 08ХМФА и 30ХГСА, полученных методом WAAM. В процессе наплавки были изготовлены образцы из сталей 08ХМФА и 30ХГСА. Режимы наплавки варьировались для генерации различных дефектов: макродефекты (поры, непровары, поверхностные концентраторы), микроструктурные дефекты (видманштеттенова структура, разнородность и т. д.). Также были изготовлены бездефектные образцы. Для выявления микроструктуры металлов, а также распределения и характера возможных дефектов был проведен металлографический анализ. Травление образцов осуществлялось в 4 %-ном водном растворе HNO₃. Усталостные испытания проводились на специализированном стенде с нагружением образцов по схеме консольного изгиба. Наибольшую усталостную прочность показывают бездефектные образцы обеих сталей. Наличие любого рода дефектов (микроструктурных и макродефектов) приводит к снижению усталостной прочности. Макроструктурные дефекты (крупные поры и непровары) оказывают более сильное влияние на усталостную прочность материала, чем микроструктурные дефекты материала. Также установлено, что наличие поверхностного концентратора оказывает большее влияние на формирование магистральной усталостной трещины, чем крупные несплавления в центральной области образцов.

Ключевые слова: усталостная прочность, WAAM, 30ХГСА, 08ХМФА, дефекты металла

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00534.

Для цитирования: Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Мордовина Ю.С., Чернигин М.А., Мансуров Р.Ш. Влияние дефектов, возникающих в процессе WAAM, на усталостную прочность сталей 08ХМФА и 30ХГСА. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(3):242–249. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-242-249>

EFFECT OF THE DEFECTS OCCURRING DURING WAAM PROCESS ON FATIGUE STRENGTH OF 08CrMoV AND 30CrMnSi STEELS

Yu. G. Kabaldin, M. S. Anosov, Yu. S. Mordovina,
M. A. Chernigin[✉], R. Sh. Mansurov

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minina Str., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation)

[✉ honeybadger52@yandex.ru](mailto:honeybadger52@yandex.ru)

Abstract. At the moment, there are very few studies on fatigue failure of the products obtained by additive manufacturing, especially when fatigue failure occurs due to various types of defects. The importance of this topic is due to the potential for premature components damage under cyclic loading, especially in critical applications such as aviation and energy, where WAAM (wire arc additive manufacturing) can save significant manufacturing time by up to 40 – 60 %. The study evaluates the impact of technological defects on the fatigue strength of 08CrMoV and 30CrMnSi steels produced by WAAM. The authors used different surfacing modes to generate various types of defects, including macrodefects such as pores, lack of fusion, and surface concentrators, as well as microstructural defects like Widmannstetten structures and grain diversity. Defect-free samples were also produced. The authors performed metallographic analysis to investigate the metals microstructure, distribution and nature of any possible defects. Samples were etched using a 4 % aqueous HNO₃ solution. Fatigue tests were conducted on a specialized machine with

sample loading following the cantilever bending method. Defect-free samples of both steels exhibited the highest fatigue strength. The presence of any type of defect, whether microstructural or macrostructural, resulted in a decrease in fatigue strength. Macrostructural defects, such as large pores and lack of fusion, had a stronger impact on the material fatigue strength compared to microstructural defects. Additionally, it was found that the presence of a surface concentrator had a greater influence on initiation of a primary fatigue crack than the presence of large non-melted regions in the sample central part.

Keywords: fatigue strength, WAAM, 30CrMnSi, 08CrMoV, metal defects

Acknowledgements: The work was supported the Russian Science Foundation, grant No. 25-19-00534.

For citation: Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Mordovina Yu.S., Chernigin M.A., Mansurov R.Sh. Effect of the defects occurring during WAAM process on fatigue strength of 08CrMoV and 30CrMnSi steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):242–249.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-242-249>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) становятся одной из передовых технологий для высокопроизводительного производства или изготовления деталей со сложной формой [1]. Наиболее широкое распространение АТ могут находить в мелкосерийном или несерийном высокотехнологичном производстве: авиастроении, тяжелом машиностроении, оборонном производстве [2 – 5].

Усталостью материала принято называть деградацию его свойств, обусловленную накоплением микроструктурных дефектов под действием циклических нагрузок. Данный вид разрушения особенно опасен, потому что часто протекает под действием нагрузок гораздо ниже предела текучести материала в течение длительного времени. Известно, что большинство деталей механизмов и конструкций длительно работают под действием циклических нагрузок [6 – 8]. Более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения происходит в результате циклического нагружения [6; 9]. Начиная с XIX в., усталостная стойкость получает значительное теоретическое развитие и становится одним из фундаментальных свойств материалов в инженерной практике [1; 10 – 13]. Явление усталости – очень сложный многофакторный процесс. К факторам, влияющим на процесс усталости, относятся: частота нагружения [14 – 16], асимметрия цикла нагружения [17 – 18], состояние поверхности [19] и температура работы изделия [20 – 22].

Несмотря на активное изучение металла, полученного с применением АТ, вопросы, касающиеся уста-

лостного разрушения изделий, изучены недостаточно и встречаются в литературе довольно редко [23; 24]. Особенно, если усталостное разрушение происходит в присутствии дефектов различного рода [25 – 28].

В работе изучалось влияние дефектов различного рода в материале, полученном с использованием метода электродуговой наплавки (*Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM*). Технология WAAM заключается в наплавлении обычной сварочной проволоки на подложку, в результате чего образуется заготовка будущей детали. В работах [28 – 31] описаны основные аспекты технологии WAAM.

Целью данного исследования является изучение влияния дефектов различной природы на усталостную прочность металла, полученного методом WAAM.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании для наплавки образцов были использованы проволоки Нп-30ХГСА и Св-08ХМФА. Химический состав определялся методом оптико-эмиссионной спектроскопии с использованием спектрометра Foundry Master UVR, состав исходной проволоки и наплавленных заготовок представлен в табл. 1.

Заготовки образцов производились в виде стенок путем послойного нанесения металла на экспериментальной исследовательской WAAM установке, в состав которой входили: трехкоординатный станок с ЧПУ портального типа IVCNC STL, сварочный источник тока Alloy 275 ME Pulse, вытяжной шкаф, сварочный стол и сварочная горелка.

Таблица 1. Химический состав исходной проволоки для наплавки

Table 1. Chemical composition of the initial wire for surfacing

Марка	Состояние	Содержание легирующих элементов, %								
		C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V
Нп-30ХГСА	Проволока	0,269	1,000	0,93	0,099	0,015	0,020	0,961	0,005	0,007
30ХГСА	Заготовка	0,196	0,835	0,782	0,093	0,012	0,016	0,888	0,005	0,006
Св-08ХМФА	Проволока	0,087	0,138	0,29	0,174	0,016	0,012	0,975	0,484	0,156
08ХМФА	Заготовка	0,068	0,123	0,25	0,166	0,015	0,011	0,902	0,471	0,134

Таблица 2. Параметры режимов наплавки

Table 2. Parameters of surfacing modes

Номер образца	Марка стали	Параметры режима наплавки			Характеристика наплавленных образцов
		I , А	U , В	Q , Дж/мм	
1.1	08ХМФА	150	24	576	Бездефектные образцы
1.2	08ХМФА	110	13	229	Несплавления и поверхностный концентратор
2.1	30ХГСА	160	24	614	Бездефектные образцы
2.2	30ХГСА	200	18	576	Крупные скопления пор, обнаруженные после наплавки заготовок
2.3	30ХГСА	130	17	354	Аномальное строение микроструктуры

Режим наплавки задавался следующими параметрами: I – сила тока, А; U – напряжение, В; z – дуговой зазор, мм; v – скорость подачи проволоки, мм/с.

При этом дуговой зазор и скорость подачи проволоки были постоянными для всех экспериментов и составляли 11 мм и 300 мм/мин соответственно (определены путем проведения предварительных испытаний). В качестве защитного газа использовалась сварочная смесь, состоящая из 80 % Ar и 20 % CO₂ со скоростью подачи 15 л/мин для всех режимов.

Для изучения влияния микро- и макроструктурных дефектов на усталостную прочность сталей 30ХГСА и 08ХМФА были напечатаны стенки толщиной в один наплавочный валик по режимам, представленным в табл. 2.

Погонная энергия процесса Q с учетом коэффициента энергетических потерь 0,8 определялась по формуле

$$Q = \frac{0,8IU}{v}$$

Из напечатанных заготовок с помощью электроэрозионной резки вырезались плоские образцы для проведения усталостных испытаний с толщиной 3 мм и размером рабочей зоны 60×15 мм (тип IV по ГОСТ 25.502 – 78) (рис. 1). После вырезки рабочая

часть образцов обрабатывалась шлифованием до шероховатости $R_a = 0,2$. Для оценки эволюции структуры и фиксирования особенностей роста трещин в ходе усталостного нагружения рабочая поверхность части образцов подвергалась полированию и последующему травлению.

Усталостные испытания проводились на специализированном стенде по схеме консольного изгиба (коэффициент асимметрии цикла $R = -1$). Частота упругопластического циклического деформирования устанавливалась с использованием частотного преобразователя равной 8,3 Гц (500 циклов/мин). Испытания проводились с учетом требований ГОСТ 25.502 – 79. Амплитуду напряжений в цикле настраивали путем расчетов и с использованием индикатора часового типа. В процессе испытаний регистрировали: число циклов N и амплитуду напряжений в цикле σ_{max} . Общая схема испытательного стенда представлена на рис. 2.

Наработка материала образца определялась как отношение текущего количества циклов нагружения N к количеству циклов, при котором наблюдается полное разрушение материала образца N^* (N/N^*).

Для выявления микроструктуры металлов и характера возможных дефектов проводился металлографиче-

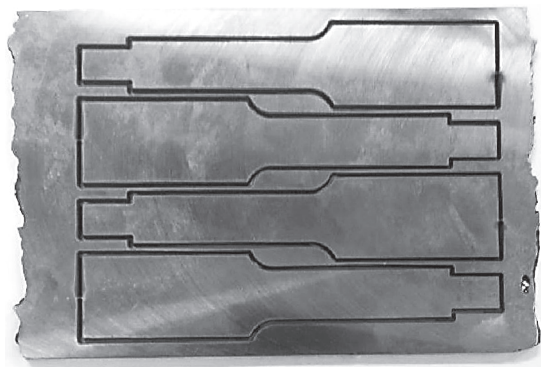


Рис. 1. Общий вид образцов после вырезки

Fig. 1. General view of the samples after cutting

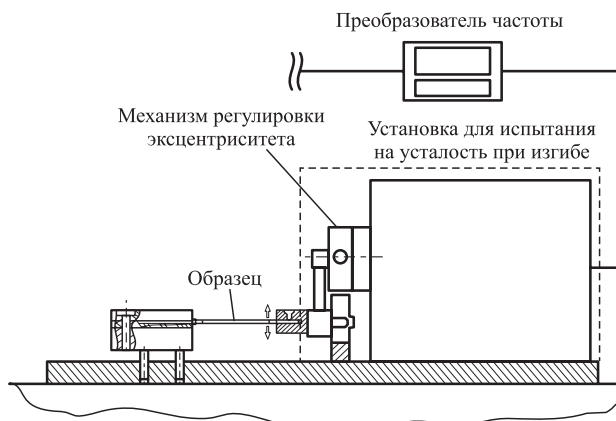


Рис. 2. Схема установки для испытания на усталость

Fig. 2. Scheme of fatigue testing installation

ческий анализ. Выявление микроструктуры осуществлялось путем протирания подготовленной поверхности ватным диском, смоченным в 4 %-ном водном растворе азотной кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе металлографического анализа образцов из стали 30ХГСА были получены результаты, представленные в табл. 3.

При исследовании наплавленных стенок в заготовке для изготовления образцов 2.2 отчетливо выделяются большие скопления макродефектов, которые могут быть охарактеризованы как поры и непровары. При наплавке заготовок для изготовления образцов 2.1 и 2.3 макродефекты практически не выявляются.

В ходе изготовления образцов 1.2 режим наплавки изменялся таким образом, чтобы получить несплавления между двумя наплавочными валиками. Дефекты выстроены в виде строчек, расположенных по границам сплавления слоев преимущественно в центре образцов. Также после вырезки образцов на наиболее нагруженную поверхность образца наносился концентратор глубиной порядка 130 мкм.

Данные, полученные в ходе усталостных испытаний образцов из сталей 30ХГСА и 08ХМФА, представлены на рис. 3.

Наибольшую усталостную прочность показывают бездефектные образцы. Исходя из данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что наличие любого рода дефектов (микроструктурных и макро-структурных) приводит к снижению усталостной прочности. Макроструктурные дефекты (крупные поры и непровары) оказывают более сильное влияние на усталостную прочность материала.

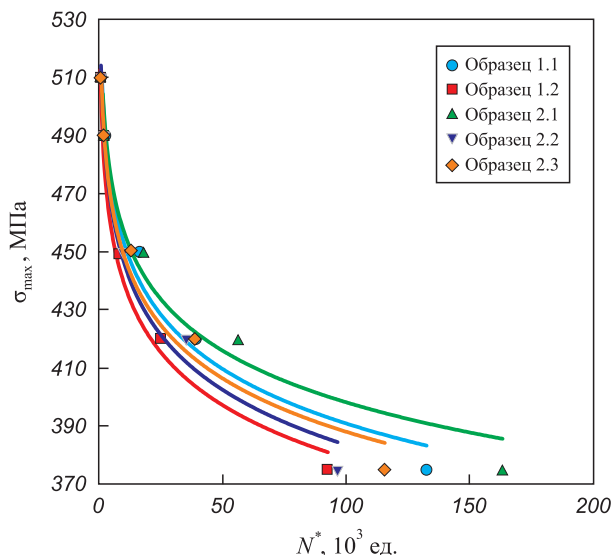


Рис. 3. Кривые усталости для сталей 30ХГСА и 08ХМФА

Fig. 3. Fatigue curves for 30CrMnSi and 08CrMoV steels

Результаты испытаний показывают, что наличие дефектов в сплаве 08ХМФА приводит к снижению долговечности исследуемого материала в среднем на 30 – 40 %.

При изучении образцов 1.2 установлено, что несмотря на наличие строчечных дефектов (непроваров) в опасном сечении, они не являются причинами образования магистральной трещины, которая привела к разрушению образца. Очагом зарождения трещины являлся дефект поверхности глубиной 0,136 мкм. Именно здесь наблюдается наиболее активный рост трещины, особенно в момент предразрушения.

Вывод о более сильном влиянии качества поверхности (поверхностного концентратора) можно также сделать исходя из микроснимков, полученных при изучении разрушенного образца (рис. 4). Видно, что очагом разрушения выступил предварительно нанесенный концентратор. Магистральная трещина практически не пересекает непровары и образовавшиеся вокруг них трещины.

Схожие выводы о влиянии технологических дефектов на усталостную прочность деталей получены и другими исследователями [32 – 34]. Так, в работе, направленной на изучение влияния литейных дефектов на усталостную прочность надрессорных балок и боковых рам, было установлено, что литейные дефекты приводят к снижению усталостной прочности на 33 – 47 % [32].

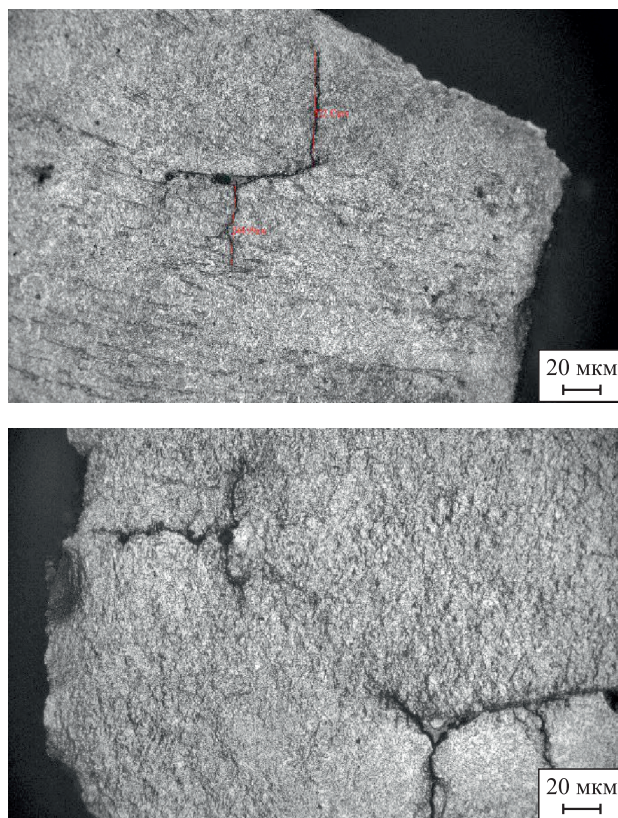


Рис. 4. Разрушенный образец из стали 08ХМФА

Fig. 4. Destroyed 08CrMoV steel sample

Таблица 3. Результаты металлографического анализа

Table 3. Results of metallographic analysis

Номер образца	Микроструктура образца	Описание микроструктуры
1.1		<p>Феррит-перлитная структура. Феррит выделяется преимущественно в виде замкнутых сеток, также замечены следы Видманштеттеновой структуры</p>
1.2		<p>Феррит-перлитная структура. Феррит выделяется преимущественно в виде замкнутых сеток, также замечены следы Видманштеттеновой структуры</p>
2.1		<p>Феррит и сорбит. По высоте образца фиксируется незначительная структурная неоднородность, выражающаяся в различной дисперсности сорбита</p>
2.2		<p>Феррит и сорбит. По высоте образца выделяется структурная неоднородность, отчетливо выделяются места с крупными ферритными колониями</p>
2.3		<p>Аномальная феррит-перлитная структура. Феррит выделяется в виде замкнутых сеток. В металле замечена Видманштеттенова структура. Перлит имеет как пластинчатую, так и частично сфероидизировавшуюся морфологию</p>

Также в данном исследовании указывается на наиболее критичное с точки зрения усталостной прочности поверхностное и подповерхностное расположение дефектов [32]. Схожие выводы о влиянии поверхностных дефектов были получены при изучении сварных соединений [34].

Выводы

В ходе проведения усталостных испытаний образцов из сталей 08ХМФА и 30ХГСА наибольшие значения показывали бездефектные образцы для обеих марок.

Исходя из данных, полученных при исследовании образцов из стали 30ХГСА, можно сделать вывод, что наличие любого рода дефектов (микроструктурных и макроструктурных) приводит к снижению усталостной прочности. Макроструктурные дефекты (крупные поры и непровары) оказывают более сильное влияние на усталостную прочность материала.

Так, для образцов, имеющих аномальное строение микроструктуры (образцы 2.3), наблюдается снижение усталостной прочности на 28 % относительно бездефектного материала (образец 2.1). В образцах 2.2, имеющих макроскопические дефекты технологического характера (крупные поры и непровары), также происходит значительное снижение усталостной прочности, достигающее 39 %.

Схожие результаты получены и для стали 08ХМФА: усталостная прочность образца с непроварами и поверхностным концентратором (образец 1.2) снижается на 31 %.

Также следует отметить, что наличие поверхностного концентратора оказывает большее влияние на формирование магистральной усталостной трещины, чем несплавления в центральной области образцов. Данный эффект подтверждается изучением поверхности образца в процессе усталостного испытания и после его разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Tang W., Tang Z., Lu W., Wang S., Ming Y. Modeling and prediction of fatigue properties of additively manufactured metals. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2023;36:181–213. <https://doi.org/10.1007/s10338-023-00380-5>
2. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2):242–69. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
3. Beaman J., Bourell D.L., Seepersad C., Kovar D. Additive manufacturing review: Early past to current practice. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):110812. <https://doi.org/10.1115/1.4048193>
4. Hergul Y., Goynuk T., Yucel M., Kan G., Yaman U. Performance and microstructure analysis of cylindrical rods fabricated by dot-by-dot WAAM for aerospace applications. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025;10:9355–9370. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01166-6>
5. Viliš J., Pokorný Z., Zouhar J., Vítek R., Fornůšek T. Comparative analysis of metal components manufactured by WAAM technology for the strike face layer of ballistic protection. *Materials Science Forum*. 2025;1151:3–12. <https://doi.org/10.4028/p-2gbZ6u>
6. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel. *International Journal of Fatigue*. 2018;106:153–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.003>
7. Трефилова Т.А., Бирюкова Г.А. Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий. *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2020;(4):41–44.
Trefilova T.A., Biryukova G.A. Reliability measures at the stages of design, production and operation of products. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2020;(4):41–44. (In Russ.).
8. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М: Наука; 2015:484.
9. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСИС; 1998:400.
10. Schütz W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 1996;54(2):263–300. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00178-6)
11. Liu J., Pan X., Li Y., Chen X. A two-point method for multi-axial fatigue life prediction. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2022;35:316–327. <https://doi.org/10.1007/s10338-021-00287-z>
12. Zhao T., Kang G. Fatigue life prediction for NiTi shape memory alloy microtubes under uniaxial stress-controlled one-way shape memory cyclic loading. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2022;35:15–25. <https://doi.org/10.1007/s10338-021-00255-7>
13. Yi M., Tang W., Zhu Y., Liang Ch., Tang Z., Yin Y., He W., Sun Sh., Su Sh. A holistic review on fatigue properties of additively manufactured metals. 2023:202. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20695.24486>
14. Нгуен Нгок Т., Капралов В.М., Коленько Г.С. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материалов. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019;25(2):68–77. <https://doi.org/10.18721/JEST.25205>
Nguyen Ngoc T., Kapralov V.M., Kolenko G.S. Effect of loading frequencies on fatigue resistance of materials. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*. 2019;25(2):68–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JEST.25205>
15. Hu Y., Sun C., Xie J., Hong Y. Effects of loading frequency and loading type on high-cycle and very-high-cycle fatigue of a high-strength steel. *Materials*. 2018;11(8):1456. <https://doi.org/10.3390/ma11081456>
16. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Кондрашкин О.Б., Чернышов Е.А., Пронин А.И. Изменение показателей сопротивления усталости конструкционных сталей при различных спектрах нагружения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(10):796–802. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-796-802>

- Myl'nikov V.V., Shetulov D.I., Kondrashkin O.B., Chernyshov E.A., Pronin A.I. Changes in fatigue resistance of structural steels at different loading spectra. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(10):796–802. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-796-802>
17. Фигура К.Н. Влияние асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность трубопроводов в условиях коррозионного повреждения. *Вестник ИИИ ДВФУ*. 2020;(2(43)):13–22.
- Figura K. Influence of asymmetry of the loading cycle on the fatigue strength of pipelines under corrosion damage. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;(2(43)):13–22. (In Russ.).
18. Meraj M., Dutta K., Bhardwaj R., Yedla N., Karthik V., Pal Sh. Influence of asymmetric cyclic loading on structural evolution and deformation behavior of Cu-5 at. % Zr alloy: An atomistic simulation-based study. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017;26:5197–5205. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3003-1>
19. Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Филиппов А.А., Нuzhdина Т.В. Механические характеристики сталей с газофазным никелевым покрытием. *Технология металлов*. 2019;(2):34–37. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2019-2-0-34-37>
- Pachurin G.V., Kuz'min N.A., Filippov A.A., Nuzhdina T.V., Goncharova D.A. Mechanical properties of steel after gas-phase application of a nickel coating. *Russian Engineering Research*. 2019;39(7):577–579. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19070153>
20. Nagesha A. Influence of temperature on the low cycle fatigue behaviour of a modified 9Cr–1Mo ferritic steel. *International Journal of Fatigue*. 2002;24(12):1285–1293. [https://doi.org/10.1016/s0142-1123\(02\)00035-x](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(02)00035-x)
21. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Naumov V.I., Sentyureva V.I. The effect of low temperatures on the operability of products 20GL steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1431(1):012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1431/1/012063>
22. Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures. *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2021;57:21–30. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010083>
23. Schneider J., Farris L., Nolze G., Reinsch S., Cios G., Tokarski T., Thompson S. Microstructure evolution in Inconel 718 produced by powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022;6(1):20. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010020>
24. Wegener T., Wu T., Sun F., Wang C., Lu J., Niendorf T. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on microstructure, tensile and low-cycle fatigue behavior of additively manufactured stainless steel 316L. *Metals*. 2022;12(9):1425. <https://doi.org/10.3390/met12091425>
25. Liu F., He C., Chen Y., Zhang H., Wang Q., Liu Y. Effects of defects on tensile and fatigue behaviors of selective laser melted titanium alloy in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*. 2020;140:105795. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105795>
26. Biswal R., Zhang X., Syed A.K., Awd M., Ding J., Walther F., Williams S. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire + arc additive manufactured titanium alloy. *International Journal of Fatigue*. 2019;122:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.017>
27. Wang S., Zhan L., Xi H., Xiao H. A unified approach toward simulating constant and varying amplitude fatigue failure effects of metals with fast and efficient algorithms. *Acta Mechanica Sinica*. 2021;34:53–64. <https://doi.org/10.1007/s10338-020-00187-8>
28. Nguyen V.T., Minh P.S., Uyen T.M.T., Do T.T., Ngoc H.V.T., Le M.T., Nguyen V.T.T. WAAM Technique: Process parameters affecting the mechanical properties and microstructures of low-carbon steel. *Metals*. 2023;13(5):873. <https://doi.org/10.3390/met13050873>
29. Kabaldin Yu., Shatagin D., Ryabov D., Solovyov A., Kurkin A. Microstructure, phase composition, and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method. *Metals*. 2023;13(5):851. <https://doi.org/10.3390/met13050851>
30. Blinn B., Hassel T., Viebranz V.F., Beck T., Maier H.J. Influence of the grain orientation and δ -ferrite on the cyclic deformation behavior of an austenitic CrNi steel manufactured by wire and arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*. 2023;870:144612. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144612>
31. Treutler K., Wesling V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Applied Sciences*. 2021;11(18):8619. <https://doi.org/10.3390/app11188619>
32. Пастухов И.Ф., Пастухов М.И. О влиянии литейных дефектов на сопротивление усталости литых деталей. *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2012;(3(50)):11–18.
- Pastukhov I.F., Pastukhov M.I. On the effect of casting defects on fatigue strength of cast parts. *Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2012;(3(50)):11–18. (In Russ.).
33. Майсурадзе М.В., Антаков Е.В. Анализ причин усталостного разрушения деталей машин. *Сталь*. 2021;(10):47–53.
- Maisuradze M.V., Antakov E.V. Analysis of fatigue failure causes of machine components. *Steel in Translation*. 2021;51(10):745–751. <http://doi.org/10.3103/S0967091221100089>
34. Kashyadeh K.R., Ganjabin M.A., Moghbeli S., Abu-Nidzhim R., Khlopkov S., Laad M. Effects of surface-level defects on tensile and fatigue strength of spot weld bonding–three-sheet steel. *International Journal of Engineering*. 2025;39(8):1855–1864. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.08b.07>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юрий Георгиевич Кабалдин, д.т.н., профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0003-4300-6659

E-mail: uru.40@mail.ru

Максим Сергеевич Аносов, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0001-8150-9332

E-mail: anosov-maksim@list.ru

Юлия Сергеевна Мордовина, инженер института переподготовки специалистов, ассистент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

ORCID: 0009-0003-2640-9779

E-mail: ips4@nntu.ru

Михаил Алексеевич Чернигин, инженер кафедры «Технология и оборудование машиностроения», аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

ORCID: 0009-0005-6494-2851

E-mail: honeybadger52@yandex.ru

Ренат Шарифович Мансуров, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0002-1403-1751

E-mail: renat-m1@mail.ru

Yurii G. Kabaldin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Technology and Engineering Equipment", R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0003-4300-6659

E-mail: uru.40@mail.ru

Maksim S. Anosov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Technology and Engineering Equipment", R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0001-8150-9332

E-mail: anosov-maksim@list.ru

Yuliya S. Mordovina, Engineer of the Institute of Retraining of Specialists, Assistant of the Chair "Technology and Engineering Equipment", Postgraduate, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0009-0003-2640-9779

E-mail: ips4@nntu.ru

Mikhail A. Chernigin, Engineer of the Chair "Technology and Engineering Equipment", Postgraduate, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0009-0005-6494-2851

E-mail: honeybadger52@yandex.ru

Renat Sh. Mansurov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Technology and Engineering Equipment", R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0002-1403-1751

E-mail: renat-m1@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Ю. Г. Кабалдин – составление плана экспериментального исследования, научное руководство, редактирование статьи.

М. С. Аносов – научное руководство, редактирование статьи, проведение усталостных испытаний.

Ю. С. Мордовина – металлографический анализ, оформление и редактирование статьи.

М. А. Чернигин – металлографический анализ, оформление и редактирование статьи.

Р. Ш. Мансуров – анализ результатов усталостных испытаний, проведение наплавки образцов, вырезка образцов.

Yu. G. Kabaldin – preparing the experimental research plan, scientific guidance, editing the article.

M. S. Anosov – scientific guidance, editing the article, fatigue testing.

Yu. S. Mordovina – metallographic analysis, design and editing of the article.

M. A. Chernigin – metallographic analysis, design and editing of the article.

R. Sh. Mansurov – analysis of fatigue test results, sample surfacing, sample cutting.

Поступила в редакцию 04.09.2025

После доработки 08.10.2025

Принята к публикации 03.04.2026

Received 04.09.2025

Revised 08.10.2025

Accepted 03.04.2026