

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.791.92.019:004.9
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-188-196



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ МЕТАЛЛА ЗАГОТОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ, НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С.

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

Аннотация. Стремясь к снижению себестоимости производства, современная промышленность все чаще обращается к аддитивным способам получения заготовок. Несмотря на очевидные преимущества аддитивного выращивания металлов, особенности данных технологий до сих пор изучены недостаточно хорошо. Рассматриваемые в данной работе методы 3D-печати металлами (SLM и WAAM) обладают рядом недостатков, среди которых основными являются возможность образования повышенной пористости заготовок, высокий уровень остаточных напряжений в материале и структурная неоднородность наплавленного металла. Целью данного исследования являлась оценка пористости и структурных дефектов наплавленного металла и разработка метода оценки степени опасности дефектов материалов на основе нейронносетового моделирования. В ходе проведения работы были изготовлены образцы из аустенитных сталей 12X18H10T методом селективного лазерного спекания (SLM) и 08X18H10 методом электродугового наплавки (WAAM). Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Altamі MET1C при увеличениях $\times 50$, 100, 200. В частности, была проведена оценка загрязненности наплавленного металла неметаллическими включениями в соответствии с ГОСТ 1778. Для исследования природы образования пористости в работе проводилось фрактографическое исследование излома образцов на растяжение. Для изучения влияния дефектов в наплавленном металле на прочностные свойства были проведены испытания на растяжение. Для оценки степени опасности различных дефектов был проведен количественный и фрактальный анализ микроструктур с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного в MATLAB. Обучение нейросетевой модели также проводилось с использованием MATLAB. В ходе проведения исследования было установлено, что на образование пористости в образцах после SLM оказывает сильное влияние качество исходного сырья. Образцы, полученные путем электродугового выращивания, обладают меньшей пористостью и загрязненностью неметаллическими включениями относительно образцов после лазерного спекания. Установлена линейная связь между показателем фрактальной размерности микроструктуры и площадью пор и несплавлений в анализируемом цифровом изображении микроструктуры, подтверждаемая результатами испытаний на растяжение.

Ключевые слова: аддитивное выращивание, SLM, WAAM, пористость, дефекты наплавленного металла, нейронносетовое моделирование, фрактальный анализ

Исследование выполнено при поддержке 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».

© Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С., 2024

Для цитирования

Оценка влияния дефектности металла заготовок, полученных аддитивными методами, на прочностные свойства с использованием нейронносетового моделирования / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3.С. 188-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-188-196>



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

NEURAL NETWORK MODELING USED TO ASSESS THE EFFECT OF METAL DEFECTS OF BLANKS PRODUCED BY ADDITIVE METHODS ON STRENGTH PROPERTIES

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Chernigin M.A., Mordovina Yu.S.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In an effort to reduce production costs, modern industry has increasingly turned to additive methods for producing blanks. Although benefits of additive metal production are obvious, the characteristics of these techniques have not been sufficiently studied. The paper describes the methods of 3D printing with metals, such as selective laser melting (SLM) and wire arc additive manufacturing (WAAM), showing several disadvantages. These include the possibility of forming increased porosity in blanks, as well as high residual stresses in the material and structural heterogeneity in the deposited metal. The research was aimed at assessing porosity and structural defects in the deposited metal, and developing a method to determine the degree of risk of material defects using neural network modeling. During the research, samples were produced from austenitic steels 12Kh18N10T using SLM and 08Kh18N10 using WAAM. Metallographic studies were conducted with an Altami MET 1C optical microscope with magnifications of $\times 50$, 100 and 200. In particular, the level of contamination of the deposited metal with non-metallic inclusions was evaluated in accordance with GOST 1778. To study the nature of the porosity formation, the authors conducted a fractographic analysis of fracture in tensile samples. Tensile tests were performed to study the effect of defects in deposited metal on strength characteristics. Using specialized software developed in Matlab, a quantitative and fractal analysis of microstructure was performed to assess the risk entailed by various defects. A neural network model was also trained using Matlab. The study showed that the formation of porosity in the samples produced by SLM was greatly influenced by the quality of the feedstock material. The samples produced by WAAM have lower porosity and contamination with non-metallic inclusions compared with the samples produced by laser melting. The paper contains a linear relationship established between the fractal dimension of the microstructure and the area of pores and zones of faulty fusion in the analyzed digital image of the microstructure proved by the tensile tests.

Keywords: additive manufacturing, SLM, WAAM, porosity, defects of deposited metal, neural network modeling, fractal analysis

The study was supported by grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-00095 "Developing the scientific and technological framework for structuring of construction materials produced by wire arc additive manufacturing to form mechanical properties of fatigue, using artificial intelligence approaches".

For citation

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Chernigin M.A., Mordovina Yu.S. Neural Network Modeling Used to Assess the Effect of Metal Defects of Blanks Produced by Additive Methods on Strength Properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 188-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-188-196>

Введение

В настоящее время взамен классическим технологиям получения заготовок все чаще находят свое применение различные технологии аддитивного выращивания. К числу наиболее распространенных методов 3D-печати можно отнести технологию SLM (Selective laser melting, на русском языке – селективное лазерное спекание) и WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing, на русском языке – электродуговое выращивание) [1-3]. В процессе аддитивного выращивания могут успешно изготавливаться заготовки из сплавов на основе Ti [4], Al [5], стали [6] и Ni [7], что является преимуществом данных технологий. К преимуществам аддитивных методов производства также можно отнести:

- 1) возможность полной автоматизации изготовления заготовок изделий;
- 2) снижение ресурсоемкости производства, особенно сильно проявляющееся при производстве изделий из дорогостоящих материалов, например титана и никелевых сплавов;
- 3) снижение общей себестоимости выпуска продукции, обеспечивающее возможность выпуска единичных и мелкосерийных изделий, экономически не выгодных при применении традиционных технологий [8, 9].

Технология SLM осуществляет послойное сплавление металлического порошка за счет энергии лазера, что позволяет производить сложные по конфигурации заготовки изделий с использованием CAD-моделей [10].

Технология WAAM заключается в наплавлении обычной сварочной проволоки, широко распространенной в продаже, на подложку, в результате чего образуется заготовка будущей детали. По сравнению с традиционным производством, WAAM позволяет сократить время изготовления на 40-60% и время последующей обработки на 15-20% в зависимости от размера детали [4].

Однако заготовки, полученные с применением аддитивных технологий, могут иметь ряд существенных недостатков [11-13], таких как повышенная пористость, высокий уровень остаточных напряжений материала, а также структурная неоднородность металла.

Целью исследования является оценка пористости и дефектов структуры аустенитных сталей, полученных с использованием методов SLM и WAAM, а также разработка метода оценки степени опасности дефектов материалов на основе нейронносетового моделирования.

Материалы и методики исследования

Изготовление образцов методом SLM осуществлялось из порошка стали 10X18H10T с размером сферических частиц 50-80 мкм. Наплавка образцов выполнялась в виде брусков на установке Rusmelt 300M. Было получено несколько образцов с использованием разного исходного порошка (образцы №1 и 2). При наплавке образцов использовался порошок, изготовленный одним производителем, но образец №1 наплавлялся с использованием только что вскрытой упаковки, а порошок для образца №2 уже использовался до этого, и заводская упаковка была вскрыта заранее.

Образцы, изготовленные методом WAAM, выполнялись в виде стенок 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. Реализуемый на стенде способ 3D-печати на станках с ЧПУ защищен патентом RU 2696121C1. Наплавка образцов осуществлялась сварочной проволокой Св-08X18H10 (ER308Lsi).

Таблица 1. Химический состав наплавленных образцов
Table 1. Chemical composition of the deposited samples

Марка материала и способ наплавки	Содержание химического элемента, %									
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	Mo	Cr	Ti
10X18H10T, SLM	0,080	0,694	0,432	0,236	0,147	10,600	0,296	0,991	17,100	0,472
08X18H10, WAAM	0,011	1,803	0,791	0,012	0,013	10,210	0,102	0,091	18,951	0

Металлографические исследования проводились в поперечном сечении относительно направления наплавки при увеличениях $\times 50$, 100, 200 на оптическом микроскопе *Altami METIC*. Приготовление шлифов осуществлялось по стандартной методике при помощи механического шлифования наждачной бумагой различной зернистости и полирования с использованием паст. В качестве реактива при химическом травлении применялся раствор, состоящий из $5 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3$, $50 \text{ см}^3 \text{ HCl}$ и $50 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$.

Химический состав наплавленного металла определялся на оптико-эмиссионном анализаторе Foundry-Master и представлен в **табл. 1**.

Количественный и фрактальный анализ микроструктур проводили с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного в MATLAB. Обучение нейросетевой модели производили также с использованием программной среды MATLAB.

Фрактографическое исследование образцов осуществлялось на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3. Испытания на растяжение проводились на плоских пропорциональных образцах толщиной 6 мм (тип I по ГОСТ 1497).

Полученные результаты и их обсуждение

Основной проблемой аддитивного производства заготовок считают повышенную пористость образцов. Особенно это касается метода SLM, так как металлические порошки, используемые при наплавке, имеют высокую удельную поверхность, что обуславливает возможность наличия высокой пористости в наплавленном металле. В случае ненадлежащих условий хранения исходного порошка на поверхности порошинок может происходить адсорбция загрязняющих веществ, что также повышает риск возникновения повышенной пористости.

Для изучения образования пористости металла и загрязненности неметаллическими включениями проводилось исследование поверхности нетравленных шлифов. Степень загрязненности металла неметаллическими включениями определялась на микрошлифах при увеличении $\times 100$ (**рис. 1**) в соответствии с ГОСТ 1778-2022.

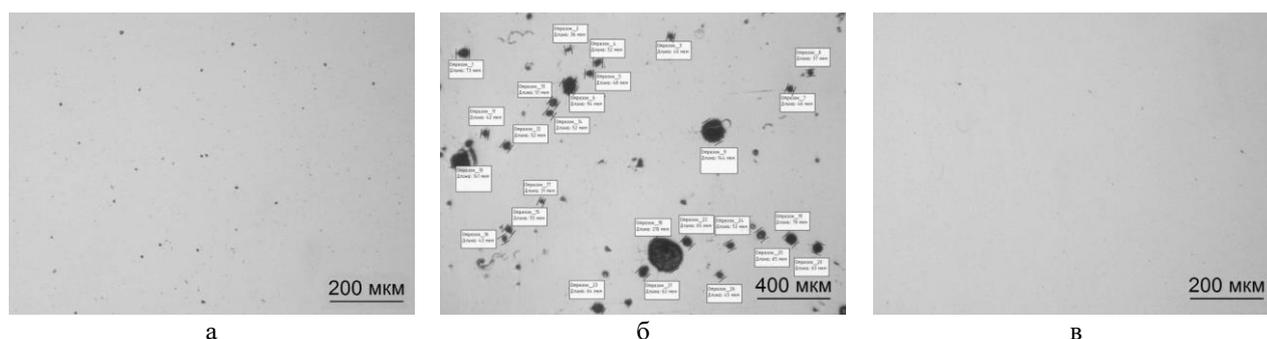


Рис. 1. Нетравленные шлифы образцов:

а – SLM, образец №1, $\times 100$; б – SLM, образец №2, $\times 50$; в – WAAM, $\times 100$

Fig. 1. Non-etched metallographic samples: а is SLM, sample No. 1, $\times 100$; б is SLM, sample No. 2, $\times 50$; в is WAAM, $\times 100$

В ходе исследования нетравленных шлифов в образце № 2, наплавленном методом SLM, выявлено большое количество пор и подсузачных раковин [14], оценка загрязненности неметаллическими включениями не представляется возможной. На образование таких скоплений пор может оказывать влияние загрязнение порошка различными примесями или нерасплавление отдельных частиц металлического порошка, что подтверждается литературными данными [15]. На нерасплавление отдельных частиц порошка указывают также результаты фрактографического исследования разрывных образцов (рис. 2).

На поверхности излома разрывного образца отчетливо выделяются сферические частицы, соответствующие по размеру исходному порошку. Результаты исследования на загрязненность неметаллическими включениями представлены в табл. 2.

При анализе результатов определения загрязненности неметаллическими включениями установлено, что металл образцов, наплавленных методом WAAM,

содержит меньшее количество включений. Следует отметить, что максимально допустимая загрязненность неметаллическими включениями регламентируется при изготовлении конкретного изделия. Загрязненность оксидами точечными 2 балла может допускаться даже при изготовлении изделий из особо высококачественных сталей.

Особенностью применения аддитивного выращивания при изготовлении заготовок изделий является образование большого количества наплавочных валиков, структурно схожих со сварным швом в традиционных технологиях. Считается, что сварной шов в изделии, полученном традиционными методами, является слабым местом, и разрушение будущей детали будет происходить в зоне термического влияния (ЗТВ). Вследствие этого изучение границ наплавочных валиков представляло наибольший интерес при металлографическом исследовании. Микроструктуры границ наплавочных валиков представлены на рис. 3.

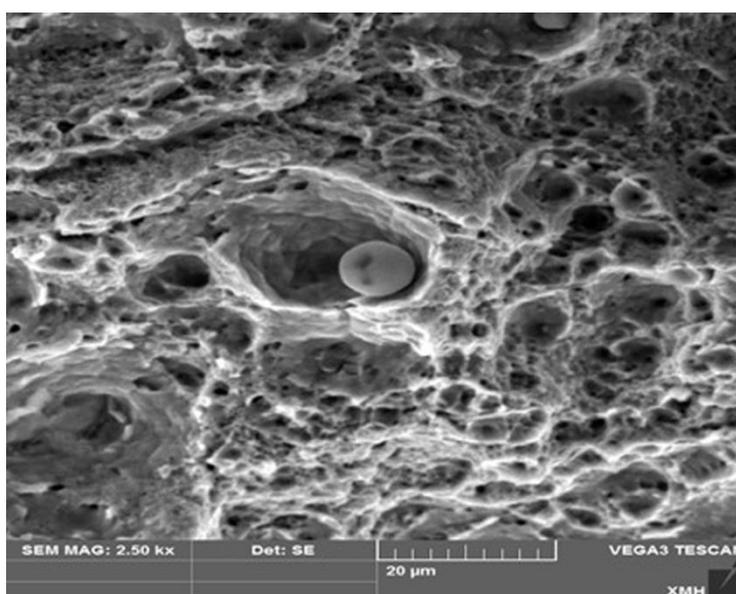


Рис. 2. Фрактограмма излома образца №2, полученного методом SLM, после его растяжения, $\times 2500$

Fig. 2. Fractograph of fracture of sample No. 2 produced by SLM after tension, $\times 2500$

Таблица 2. Загрязненность металла неметаллическими включениями
Table 2. Contamination of metal with non-metallic inclusions

Вид включения	Балл по ГОСТ 1778	
	Образец № 1, SLM	WAAM
Оксиды точечные	2	0,5
Оксиды строчечные	0	0
Нитриды точечные	1	0
Нитриды строчечные	0	0
Сульфиды	0	0
Силикаты недеформирующиеся, хрупкие и пластичные	0	0

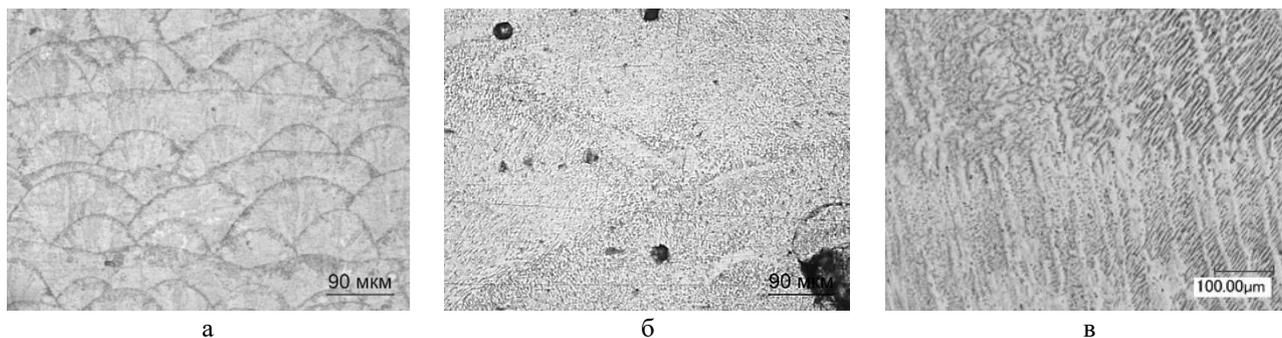


Рис. 3. Микрофотографии границы раздела металла образцов, $\times 200$:

а – SLM, образец №1; б – SLM, образец №2; в – WAAM

Fig. 3. Micrographs of the metal interfaces of the samples, $\times 200$: а is SLM, sample No. 1; б is SLM, sample No. 2; в is WAAM

Несмотря на различную толщину наплавочных валиков, изменяющуюся от 0,2-0,5 мм для метода SLM и составляющую около 0,8-1,4 мм для метода WAAM, по границам раздела различных наплавленных слоев отсутствуют различные несплавления.

Структура образца № 1, наплавленного методом SLM (рис. 3, а), представлена относительно мелкими аустенитными зёрнами, направленными в направлении отвода тепла. Отчетливо наблюдаются аустенитные двойники. Ближе к границам сплавления слоев происходит измельчение структуры, видны anomalно мелкие аустенитные зёрна (также ориентированы по направлению отвода тепла).

Микроструктура образца № 2, полученного методом SLM, схожа со структурой, получаемой методом WAAM, это может быть обусловлено большей толщиной наплавочных слоев, а следовательно, меньшим термическим влиянием, оказываемым наплавкой последующих слоев металла. Структура обоих образцов преимущественно дендритная (рис. 3 б, в). Вблизи границы сплавления дендриты ориентированы нормально к ней, что может быть обусловлено наличием градиента температур, а в глубине наплавленного металла расположены беспорядочно. Следует отметить, что в образце № 2, наплавленном методом SLM, образуется преимущественно ячеисто-дендритная структура, а в случае наплавки WAAM структура изменяется по мере движения от границы сплавления в глубину наплавленного металла от яче-

исто-дендритной к преимущественно дендритной с неупорядоченной ориентировкой.

По результатам проведенных исследований была разработана нейросетевая модель, позволяющая проводить оценку степени опасности дефектов в процессе SLM- и WAAM-печати. Степень опасности дефекта в нейронной сети задавалась коэффициентом K (степень опасности), который изменялся от 0 до 1, где 0 – безопасный уровень дефектов и 1 – опасный уровень дефектов, приводящий к ускоренному разрушению материала в процессе эксплуатации.

Для оценки степени опасности дефектов микроструктуры фотографии микроструктур предварительно обрабатывались с использованием программного обеспечения MATLAB. По результатам обработки красным цветом выделялись области (поры, микротрещины, несплавления частиц и др.), относящиеся к дефектам микроструктуры. После чего в используемом программном обеспечении производился подсчет:

- 1) количества дефектов N в анализируемом изображении микроструктуры на 1 мм^2 микроструктуры;
- 2) общей относительной площади дефектов в анализируемом изображении Q (от 0 до 1);
- 3) фрактальной размерности изображения микроструктуры DF , которая отражает устойчивость формирования скопления дефектов на анализируемом изображении микроструктуры.

Для оценки степени опасности дефектов выявленные количественные показатели отправляется на вход нейросетевой модели (рис. 4), где на выходе определяется степень опасности дефектов (показатели 1, 2, 3 и т.д.) анализируемой микроструктуры. Оценка опасности дефектов производилась на основе анализа не менее 10-ти фотографий микроструктур из различных зон образцов свидетелей.

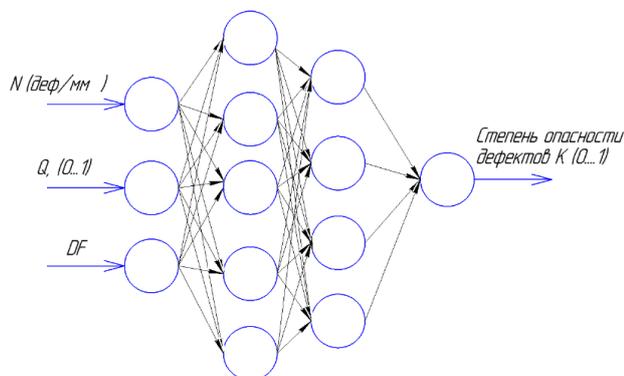


Рис. 4. Нейросетевая модель оценки степени опасности дефектов при аддитивном выращивании

Fig. 4. A neural network model for assessing the risk of defects in additive manufacturing

На рис. 5 показана зависимость фрактальной размерности микроструктуры от площади пор и несплавлений на примере сплава 12X18H10T. Данная зависимость носит линейный характер, следовательно, параметры Q и DF в нейросетевой модели скоррелированы, а для прогнозирования степени опасности дефектов можно использовать только один показатель (рис. 5).

Анализ рис. 5 показывает, что с уменьшением площади пор и скоплений фрактальная размерность увеличивается, что свидетельствует о повышении устойчивости структурного состояния металла к упругопластической деформации. В результате даже при небольшом скоплении пор на малых площадях могут образовываться субмикротрещины. Сегрегация дефектов способствует развитию субмикротрещины при внешних нагрузках.

Результаты испытаний образцов на растяжение представлены в табл. 3.

Результаты испытаний образцов, наплавленных методом WAAM (см. табл. 3), говорят о возможности использования данного метода при изготовлении заготовок изделий, так как прочностные свойства образцов достигают значений прокатанного материала даже без применения дополнительной термообработки или других методов упрочнения.

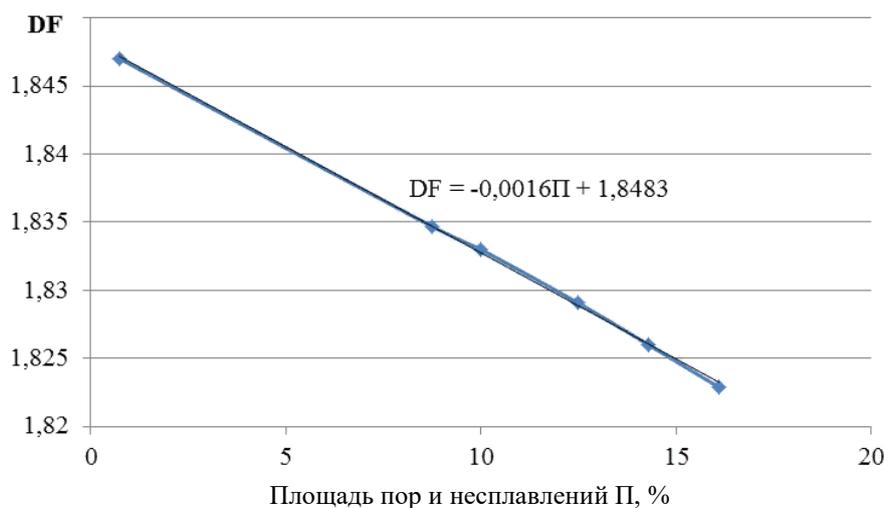


Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности цифрового изображения микроструктуры от площади пор и несплавлений П (сплав 12X18H10T), SLM-печать

Fig. 5. Relationship between the fractal dimension of the digital image of the microstructure and the area of pores and zones of faulty fusion П for the SLM printed alloy 12Kh18N10T

Таблица 3. Результаты испытаний образцов из стали 12X18H10T (SLM) и стали 08X18H9 (WAAM)
Table 3. Test results of the samples made of steel 12Kh18N10T (SLM) and 08Kh18N9 steel (WAAM)

Марка материала, способ получения	δ , %	σ_r	σ_b
		МПа	
08X18H10, прокатка	41,73	263,3	535
08X18H10, WAAM	38,2	310	555
12X18H10T, образец № 1 SLM	68	360,2	728
12X18H10T, образец № 2 SLM	67	295	520

При изучении результатов, полученных при растяжении образцов, наплавленных методом SLM, видно, что наличие в образце повышенной пористости приводит к снижению σ_b металла практически на 30%. Снижение прочностных свойств в пористом металле согласуется с данными, полученными при помощи разрабатываемой нейросетевой модели.

Прочностные свойства металла образца №1, полученного методом SLM, превосходят соответствующие значения для образца, изготовленного из проката. Данный эффект отражен в ряде исследований и может быть объяснен тем, что в данном случае один наплавленный валик занимает сравнительно малый объем относительно всего наплавленного металла, в нем могут концентрироваться различные дефекты. Скопление различных интерметаллидов и возможных структурных дефектов отчетливо видно на рис. 3, а, б. При растяжении образцов, полученных методом SLM, дефекты и интерметаллиды, скопившиеся по границам наплавленных валиков, могут выступать эффективными барьерами движения дислокаций, что, в свою очередь, приводит к повышению прочностных свойств.

Выводы

1) Рассмотрены особенности образования пор, границ раздела и включений при технологиях аддитивного выращивания. Установлено, что металлы, полученные по технологии аддитивного электродугового выращивания, имеют меньшую пористость и степень загрязненности неметаллическими включениями по сравнению с металлом, полученным по технологии SLM.

2) Наибольшее влияние на пористость металла, наплавленного методом SLM, оказывает качество исходного сырья.

3) Разработана нейросетевая модель оценки степени опасности дефектов, полученных аддитивным выращиванием на основе количественной цифровой обработки микроструктур.

4) Установлена линейная связь между показателем фрактальной размерности микроструктуры и площадью пор и несплавлений в анализируемом цифровом изображении микроструктуры.

5) Влияние пористости металла заготовок, полученных методом SLM, проявляется в снижении, прежде всего, предела прочности.

Список источников

1. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing / Li Johnnie Liew Zhong, Alkahari M.R., Rosli N.A.B., Hasan R., Sudin M.N., Ramli F.R. // *International Journal of Automation Technology*. 2019, vol. 13, no. 3, pp. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
2. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / Wu Bintao, Pan Zengxi, Ding Donghong, Cuiuri D.,

- Li Huijun, Xu Jing, Norrish J. // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, vol. 35, pp. 127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001
3. 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, pp. 459-466. DOI: 10.1007/s40684-018-0049-y
4. Wire + arc additive manufacturing / Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. // *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 7, pp. 641-647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073
5. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy / Gu Jianglong, Ding Jialuo, Williams S.W., Gu Huimin, Bai Jing, Zhai Yuchun, Ma Peihua // *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 651, pp. 18-26. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.101
6. Guo Nannan, Leu Ming. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2013, vol. 8, pp. 215-243. DOI: 10.1007/s11465-013-0248-8
7. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process / Xu Fujia, Lv Yaohui, Liu Yuxin, Shu Fengyuan, He Peng, Xu Binshi // *Journal of Material Science and Technology*. 2013, vol. 29, no. 5, pp. 480-488. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.02.010
8. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product / Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I. et al. // *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90-105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11
9. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing / Cunningham C.R., Wikshåland S., Xu F., Kemakolam N., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. // *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 650-657. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.163
10. Wang Fude, Williams S., Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 57, pp. 597-603. DOI: 10.1007/s00170-011-3299-1
11. Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: Physical Characteristics, Defects, Challenges and Applications / Svetlizky David, Das Mitun, Zheng Baolong et al. // *Materials Today*. 2021, vol. 49, pp. 271-295. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.03.020
12. Tomar Bunty, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // *Ma-*

- terials Today Communications. 2022, vol. 31, 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739
13. The influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel718 / Lan Bo, Wang Yaping, Liu Yuehan et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2021, vol. 823, 141733. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141733
 14. Васин О.Е. и др. Атлас дефектов // Научно-технический сборник. Екатеринбург: Издательские решения, 2008. 56 с.
 15. Jing G., Wang Z. Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting // *Additive Manufacturing*. 2021, vol. 38, 101831. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101831
 7. Xu Fujia, Lv Yaohui, Liu Yuxin, Shu Fengyuan, He Peng, Xu Binshi. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process. *Journal of Material Science and Technology*. 2013;29(5):480-488. DOI:10.1016/j.jmst.2013.02.010
 8. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science]. 2018;20(3):90-105. (In Russ.) DOI:10.15593/2224-9877/2018.3.11
 9. Cunningham C.R., Wikshåland S., Xu F., Kemakolam N., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:650-657. DOI:10.1016/j.promfg.2017.07.163
 10. Wang Fude, Williams S., Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;57:597-603. DOI:10.1007/s00170-011-3299-1
 11. Svetlizky David, Das Mitun, Zheng Baolong et al. Directed Energy Deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*. 2021;49:271-295. DOI:10.1016/j.mattod.2021.03.020
 12. Tomar Bunty, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. *Materials Today Communications*. 2022;31:Article ID 103739. DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.103739
 13. Lan Bo, Wang Yaping, Liu Yuehan et al. The influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel718. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;823:Article ID 141733. DOI:10.1016/j.msea.2021.141733
 14. Vasin O.E. et al. *Atlas defektov. Nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Atlas of defects. Scientific and technical collection]. Yekaterinburg: Izdatelskie resheniya, 2008, 56 p. (In Russ.)
 15. Jing G., Wang Z. Defects, densification mechanism and mechanical properties of 300M steel deposited by high power selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2021;38:Article ID 101831. DOI:10.1016/j.addma.2020.101831

References

Поступила 13.03.2024; принята к публикации 23.04.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 13/03/2023; revised 23/04/2024; published 30/09/2024

Кабалдин Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, руководитель лаборатории, Нижегородский государственный технический университет им. П.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

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

Мордовина Юлия Сергеевна – аспирант, ассистент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ips4@nntu.ru.

Yuri G. Kabaldin – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Laboratory,
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659

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

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

Yulia S. Mordovina – postgraduate student, Assistant,
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ips4@nntu.ru