

Душина А.Ю., Ольшанская Т.В., Неулыбин С.Д., Щицын Ю.Д., Никулин Р.Г. Влияние частоты тока при импульсной послойной плазменной наплавке на структуру и свойства высоколегированной стали при аддитивном формировании изделий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 20–26. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.03

Dushina A.Yu., Olshanskaya T.V., Neulybin S.D., Shchitsyn Yu.D., Nikulin R.G. Influence of current frequency during pulse layer plasma surface on the structure and properties of high-alloy steel during additive formation of products. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 20–26. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 2, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.03
УДК 621.791

А.Ю. Душина¹, Т.В. Ольшанская¹, С.Д. Неулыбин², Ю.Д. Щицын¹, Р.Г. Никулин¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт механики сплошных сред, филиал Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

**ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ТОКА В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПОСЛОЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ
НАПЛАВКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ
ПРИ АДДИТИВНОМ ФОРМИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ**

Обеспечение надлежащей микроструктуры синтезированного материала и устранение дефектности является проблемой аддитивных технологий. Активно воздействовать на структуру и свойства формируемого металла позволяет использование приемов дополнительного воздействия на сварочную ванну и наплавляемый металл.

Представлены результаты исследования влияния частоты тока в ходе импульсной послойной плазменной наплавки на стабильность формирования валиков, структуру и механические характеристики высоколегированной жаропрочной аустенитной стали 308LSi при аддитивном формировании изделий. Оценивалось влияние частоты импульсного воздействия.

Установлено, что наилучшие результаты по стабильности формирования валиков обеспечиваются при плазменной наплавке с частотой тока 500 и более 10 000 Гц. Наиболее равномерная глубина проплавления наблюдается в процессе наплавки при значениях частоты импульсного воздействия 5000, 10 000 и 15 000 Гц.

По всей высоте валика формируются столбчатые кристаллиты ячеисто-дендритного строения, и их размер постепенно уменьшается от корневой части к верхней. Для оценки влияния частоты импульсного воздействия на изменение размеров кристаллитов по высоте валиков был проведен количественный металлографический анализ наплавленных образцов. Наиболее полное выравнивание скорости роста кристаллитов проявляется при наплавке с частотой импульсного воздействия выше 5000 Гц.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что наилучшие результаты по стабильности формирования валиков, структуре и механическим характеристикам обеспечиваются при плазменной наплавке с частотой тока более 5000 Гц. Механические свойства синтезируемого материала без импульсного воздействия находятся на уровне стандартного материала, а при наложении импульса тока выше на 15–20 %.

Ключевые слова: аддитивные технологии, плазменная наплавка, импульсное воздействие, частота тока, высоколегированная сталь, микроструктура, металлографические исследования, кристаллиты, микротвердость, механические свойства.

A.Yu. Dushina¹, T.V. Olshanskaya¹, S.D. Neulybin², Yu.D. Shchitsyn¹, R.G. Nikulin¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Institute of Continuous Media Mechanics, a branch of Perm Federal Research Center
of the Ural Branch of the RAS, Perm, Russian Federation

**INFLUENCE OF CURRENT FREQUENCY DURING PULSE LAYER PLASMA SURFACE
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-ALLOY STEEL DURING ADDITIVE
FORMATION OF PRODUCTS**

Ensuring the proper microstructure of the synthesized material and eliminating defects is a problem in additive technologies. An active influence on the structure and properties of the formed metal allows the use of methods of additional impact on the weld pool and the weld metal.

The results of the study of the influence of the current frequency during pulsed layer-by-layer plasma surfacing on the stability of the formation of beads, the structure and mechanical characteristics of high-alloy heat-resistant austenitic steel 308LSi during the additive formation of products are presented. The influence of the frequency of the impulse action was evaluated.

It was found that the best results on the stability of the formation of beads are provided by plasma surfacing with a current frequency of 500 and more than 10000 Hz. The most uniform penetration depth is observed when surfacing with impulse action at frequencies of 5000, 10 000 and 15 000 Hz.

Columnar crystallites of a cellular-dendritic structure are formed along the entire height of the ridge, and their size gradually decreases from the root to the upper part. To assess the effect of the frequency of impulse action on changes in the crystallite size along the height of the beads, a quantitative metallographic analysis of the deposited samples was carried out. The most complete leveling of the crystallite growth rate is manifested during surfacing with a pulse frequency of more than 5000 Hz.

The studies carried out allow us to conclude that the best results in terms of the stability of the formation of beads, structure and mechanical characteristics are provided by plasma surfacing with a current frequency of more than 5000 Hz. The mechanical properties of the synthesized material without impulse action are at the level of a standard material, and when a current impulse is applied, it is 15–20 % higher.

Keywords: additive technologies, plasma surfacing, impulse action, current frequency, high-alloy steel, microstructure, metallographic studies, crystallites, microhardness, mechanical properties.

В последние годы активно разрабатываются технологии аддитивного изготовления металлических изделий. На сегодняшний день послойная наплавка металла является наиболее используемым способом аддитивного производства металлических изделий [1]. Однако широкое внедрение в производство сдерживается недостаточной изученностью формирования структуры и свойств получаемого материала при послойном наложении металла, отсутствием технологических рекомендаций получения бездефектных изделий [2, 3]. Общей проблемой аддитивных технологий является обеспечение надлежащей микроструктуры синтезированного материала и устранение дефектности [4].

Широкие возможности для получения качественных материалов при аддитивном формировании изделий обеспечивают технологии наплавки с использованием концентрированных источников энергии [5]. Послойная плазменная наплавка с использованием проволок позволяет получать приемлемое качество формируемых материалов при высокой производительности [6–8].

Использование приемов дополнительного воздействия на сварочную ванну и наплавляемый металл позволяет активно воздействовать на структуру и свойства формируемого металла [9–11].

Перспективным видится применение импульсной послойной плазменной наплавки с использованием проволочных присадочных материалов [12].

Ниже представлены результаты исследования влияния частоты тока в процессе импульсной послойной плазменной наплавки на структуру и механические характеристики высоколегированной жаропрочной аустенитной стали при аддитивном формировании изделий.

Плазменная наплавка производилась на пластины из стали 308LSi толщиной 10 мм. В качестве присадочного материала использовалась проволока ОК Autrod 308LSi ESAB.

С целью исследования влияния частоты импульсного воздействия при плазменной наплавке на стабильность формирования валиков, их структуру и механические свойства, а также для определения оптимальной частоты, была произведена

наплавка одиночных валиков по следующим режимам:

Средний ток наплавки – 195 А.

Напряжение на дуге – 22 В.

Расход аргона в плазме – 3 л/мин.

Подача проволоки – 3,5 м/мин.

Частота воздействия – 0–15 000 Гц.

Расстояние от образца до сечения сопла сварочной горелки h – 10 мм.

Скорость наплавки – 20 м/ч.

Диаметр присадочной проволоки – 1,2 мм.

По внешнему виду валики, полученные при наплавке с импульсным воздействием, не отличаются от валика, полученного при наплавке в непрерывном режиме. Влияние частоты импульсного воздействия на стабильность формирования валиков оценивалось по относительному отклонению изменения их ширины и высоты (рис. 1).

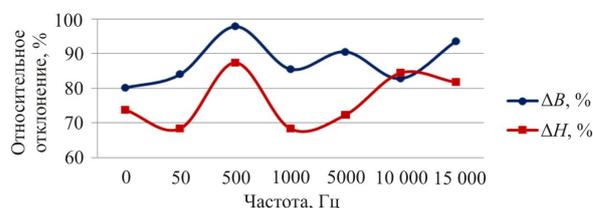


Рис. 1. Влияние частоты импульсного воздействия на относительное изменение ширины (ΔB , %) и высоты (ΔH , %) наплавленных одиночных валиков

Влияние частоты импульсного воздействия на стабильность размеров одиночных валиков имеет нелинейный характер. Наименьшее изменение высоты валиков наблюдается в процессе наплавки при значениях частоты импульсного воздействия 500 и 10 000 Гц, а наименьшее изменение ширины – при наплавке с частотами 500 и 15 000 Гц.

Для проведения металлографических исследований производилась вырезка образцов из поперечного сечения наплавленных одиночных валиков. Для исключения влияния нагрева вырезка производилась электроэрозионным методом [13].

Проведенный макро- и микроструктурный металлографический анализ образцов показал следующее. Наиболее равномерная глубина про-

плавления наблюдается в ходе наплавки при значениях частоты импульсного воздействия 5000, 10 000 и 15 000 Гц. При этом наблюдается уменьшение глубины проплавления и увеличение высоты наплавляемого металла (рис. 2).

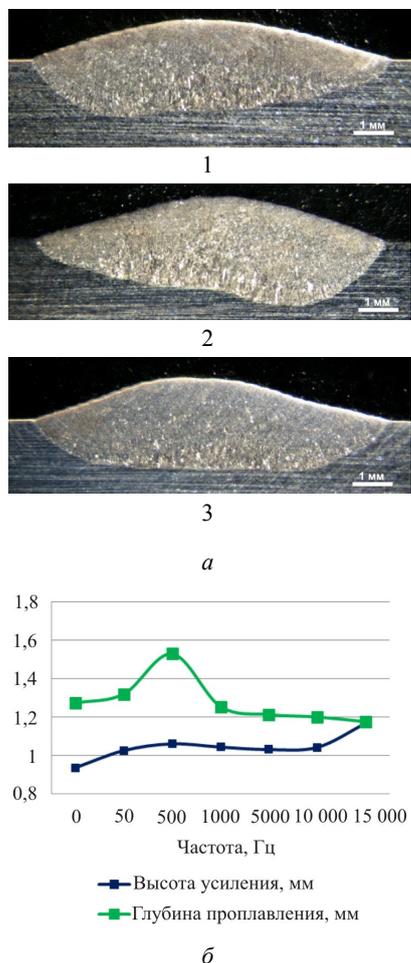


Рис. 2. Макроструктура одиночных валиков (а) и изменение глубины проплавления и высоты наплавки в зависимости от частоты импульсного воздействия (б): 1 – непрерывная наплавка; 2 – частота 500 Гц; 3 – частота 10 000 Гц

При наплавке без импульсного воздействия практически по всей высоте валика формируются столбчатые кристаллиты ячеисто-дендритного строения и их размер постепенно уменьшается от корневой части к верхней [14–16]. В верхней части образуются мелкие равноосные кристаллиты ячеистого строения (рис. 3, а). Такое изменение структуры по высоте валика свидетельствует о разной скорости роста кристаллитов при ярко выраженной направленной кристаллизации [17–23]. Применение импульсного воздействия при наплавке позволяет уменьшить степень направленного роста кристаллитов и выравнять скорость их роста по высоте валика. С увеличением частоты импульсного воздействия наблюдается уменьше-

ние объема металла со столбчатым строением кристаллитов, при этом длина кристаллитов уменьшается и увеличивается ширина, а разница между размером ячеек и дендритов уменьшается. Наиболее полное выравнивание скорости роста кристаллитов проявляется при наплавке с частотой импульсного воздействия выше 5000 Гц (рис. 3, б).

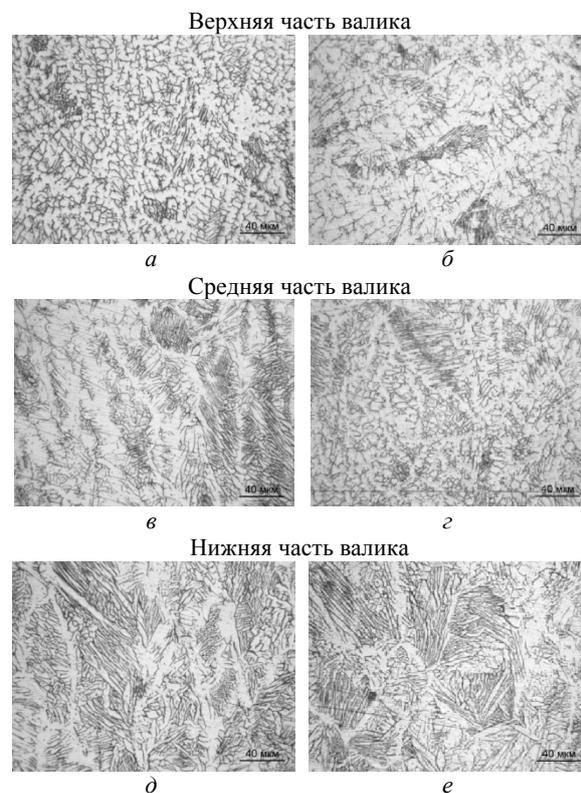


Рис. 3. Микроструктура одиночных валиков: а, в, д – непрерывная наплавка; б, г, е – частота 10 000 Гц, увеличение $\times 500$

Для оценки влияния частоты импульсного воздействия на изменение размеров кристаллитов по высоте валиков был проведен количественный металлографический анализ наплавленных образцов. Было произведено измерение площади кристаллитов и проведен статистический анализ полученных результатов.

Исследования показали, что наименьший средний размер кристаллитов в нижней части валика наблюдается в ходе наплавки при значениях частоты импульсного воздействия 1000, 5000 и 10 000 Гц, в средней части – в ходе наплавки со значениями частоты от 1000 до 15 000 Гц (рис. 4). Наибольшее уменьшение размеров столбчатых кристаллитов в корневой зоне происходит при частоте импульсного воздействия 5000 Гц.

Кроме того, при данной частоте импульсного воздействия разница между средним размером кристаллита в верхней и средней частях минимальная.

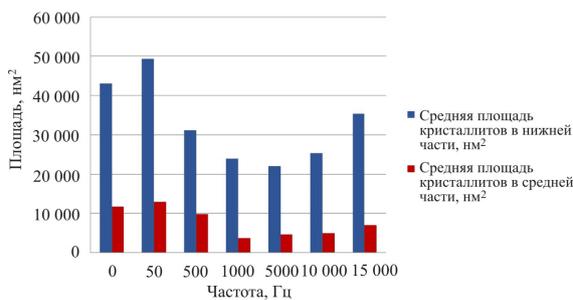


Рис. 4. Средняя площадь кристаллитов в корневой и средней частях

Изменение среднего размера кристаллитов по высоте валиков представлено на рис. 5. Наиболее плавное изменение размера кристаллитов с минимальной разницей наблюдается при частоте импульсного воздействия 5000 Гц.

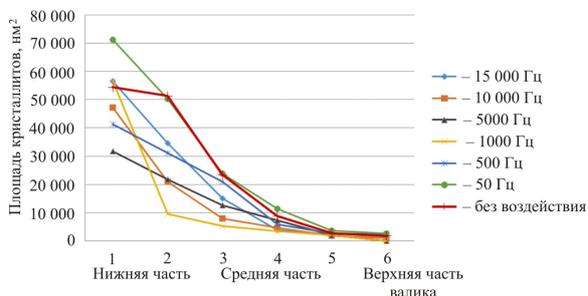


Рис. 5. Влияние частоты импульсного воздействия на площадь кристаллитов одиночных валиков

Для определения степени равноосности кристаллитов был проведен расчет коэффициента формы кристаллита. При наплавке без импульсного воздействия столбчатые кристаллиты имеют наиболее вытянутую форму, поэтому коэффициент формы в корневой части имеет наименьшее значение. Наиболее равноосные кристаллиты в корневой части при значениях частоты 1000, 5000 и 10 000 Гц, а в средней части – 10 000 Гц (рис. 6).

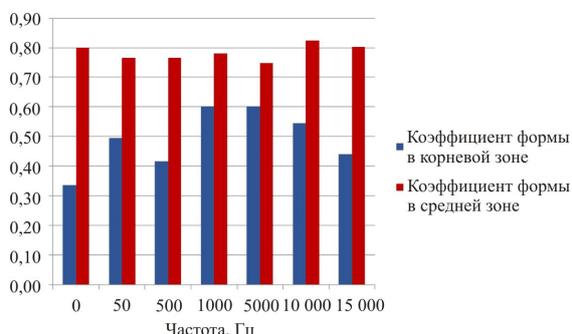
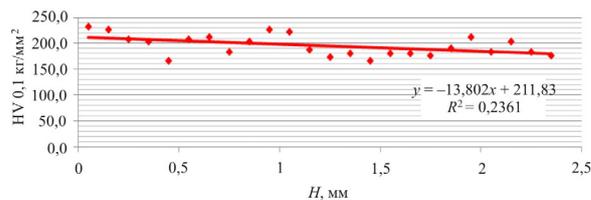


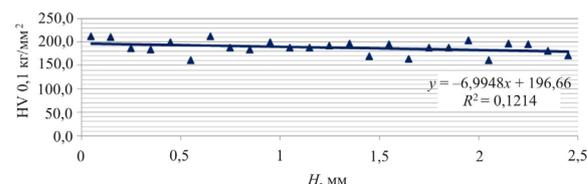
Рис. 6. Коэффициент формы кристаллитов в корневой и средней частях

Но наименьшую разницу в равноосности кристаллитов в верхней и средней частях показала частота 5000 Гц.

Механические свойства одиночных валиков и их однородность оценивались по изменению микротвердости по глубине. Измерение микротвердости проводилось при нагрузке 100 гр. с шагом 0,1 мм на приборе ПМТ-3. При наплавке в непрерывном режиме по глубине валика наблюдалось снижение твердости (рис. 7, а), а при наплавке с импульсным воздействием более 5000 Гц степень снижения твердости по глубине валика уменьшалась (рис. 7, б).



а



б

Рис. 7. Изменение микротвердости по глубине (H) валиков: а – непрерывная наплавка; б – частота 5000 Гц

Дополнительно определялись средние значения и среднеквадратичные отклонения. Результаты анализа представлены на рис. 8 и в табл. 1. Применение импульсного воздействия при наплавке способствует уменьшению среднего значения твердости валика, минимальное отклонение от среднего значения (СКО) наблюдается при частоте 5000 Гц и более.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что наилучшие результаты по стабильности формирования одиночных валиков, структуре и механическим характеристикам обеспечиваются при плазменной наплавке с частотой тока более 5000 Гц.

Для проведения испытаний на растяжение согласно утвержденной программе и методике испытаний были наплавлены образцы размером 150×90×40 мм. Параметры режима были выбраны из условия стабильного формирования одиночного валика.

Из заготовки вдоль и поперек плоскости наплавки были вырезаны образцы. Далее выполня-

лись подготовка и испытание образцов на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84¹. Дополнительно (для сравнения) в табл. 2 приведены данные механических свойств аналогичных сплавов, получаемых традиционными способами, и результаты испытаний образцов из аналогичного материала, полученного другими способами наплавки.

Таблица 1

Изменение микротвердости наплавленных валиков в зависимости от частоты импульсного воздействия

Номер образца	Частота, Гц	Твердость HV0,1 кг/мм ²			
		Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	СКО
Обр 7	0	195	165	232,9	17,5
Обр 6	50	197,8	172,5	230,5	11,9
Обр 5	500	186,4	163,4	217,1	11,9
Обр 4	1000	201,3	151,8	231,3	14,05
Обр 3	5000	181,1	166,3	203,4	7,9
Обр 2	10 000	185,5	151,8	207,4	10,3
Обр 1	15 000	187,9	160,2	211,9	11,1

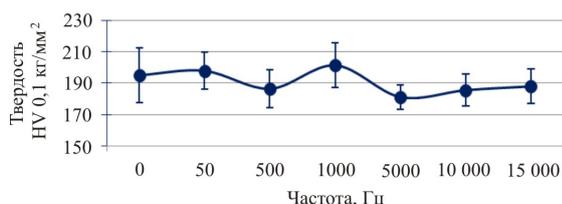


Рис. 8. Изменение твердости наплавленных валиков в зависимости от частоты тока

Таблица 2

Сравнительная таблица механических свойств

№ п/п	Способ наплавки, материал	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Примечание
1	Плазменная наплавка, прямая полярность тока с импульсным воздействием, частота 10 000 Гц	620	434	42,4	Вдоль слоев
		603	422	45,6	Поперек слоев
2	Плазменная наплавка, прямая полярность без импульсного воздействия	552	326	53,6	–
3	Сталь 04X18Н10 (закалка $T = 1020 \dots 1100$ °C)	≥ 440	≥ 155	≥ 40	ГОСТ 5949–75
4	04X18Н10 ГОСТ 25054–81	≥ 441	≥ 157	38–40	ГОСТ 25054–81

¹ ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2008. 28 с.

Механические свойства синтезируемого материала без импульсного воздействия находятся на уровне стандартного материала, а при наложении импульса тока выше на 15–20 %.

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 20-48-596006 р_НОЦ_Пермский край).

Список литературы

1. Разработка технологии послойного выращивания заготовки из высоколегированной стали методом плазменной наплавки / Е.А. Кривоносова, Ю.Д. Щицын, Д.Н. Трушников, С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.Д. Неулыбин, А.Ю. Душина // *Металлург.* – 2019. – № 2. – С. 70–77.
2. Разработка технологии послойного выращивания заготовки из высоколегированной стали методом плазменной наплавки / Ю.Д. Щицын [и др.] // *Металлург.* – 2017. – № 5. – С. 73–77.
3. Development of Layered Growth Technology for a Workpiece of Highly Alloyed Steel by Plasma Surfacing / Y.D. Shchitsyn [et al.] // *Metallurgist.* – 2017. – Vol. 61, no. 5–6. – P. 418–423.
4. Аристов С.В., Руссо В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // *Сварочное производство.* – 1982. – № 11. – С. 42–44.
5. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys / E.A. Krivonosova, Yu.D. Schitsin, D.N. Trushnikov, S.N. Myshkina, A.V. Akulova, S.D. Neulybin., A.Yu. Dushina // *Metallurgist.* – May, 2019. – Vol. 63, no. 1–2. – P. 197–205. DOI 10.1007/s11015-019-00810-1
6. Formation of 04Cr18Ni9 steel structure and properties during additive manufacturing of blanks / Y.D. Shchitsyn, S.A. Terentev, S.D. Neulybin, A.O. Artyomov // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2019. – Vol. 102, iss. 9–12. – P. 3719–3723.
7. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // *Сварка и диагностика.* – 2009. – № 2. – С. 42–45.
8. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr18Ni8Ti on low-alloy steel 09Mg2Si // *International Journal of Applied Engineering Research.* – 2015. – Vol. 10, no. 20. – P. 41103–41109.
9. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // *Автоматическая сварка.* – 1975. – № 5. – С. 7–9.
10. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling / P.A. Colegrove [et al.] // *J. Mater. Process. Technol.* – 2013. – Vol. 213. – P. 1782–1791.
11. Петров А.В., Бирман У.И. Кристаллизация металла шва при импульсно-дуговой сварке // *Сварочное производство.* – 1968. – № 6. – С. 1–3.

12. Неулыбин С.Д. Влияние полярности тока на свойства слоистых материалов, получаемых многослойной плазменной наплавкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – 135 с.

13. Металловедение и термическая обработка сталей: справ.: в 3 т. / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадт. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 352 с

14. Shlykov E., Abylaz T., Muratov K. Ensuring the accuracy of wire-cutting EDM processing of products made of hard-to-handle materials // *Obrabotka Metallov – Metal Working and Material Science*. – 2020. – Vol. 22, no. 3. – P. 6–17.

15. Ольшанская Т.В. Конструкционные материалы. Свариваемость и сварка: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 241 с.

16. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов / В.Н. Волченко, Э.Л. Макаров, В.В. Шип [и др.]; под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.

17. Особенности кристаллизации аустенитных сталей при аддитивном производстве / А.Ю. Душина, У.А. Карбатова, Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева // *Химия, экология, урбанистика*. – 2020. – Т. 1. – С. 324–328.

18. Болдырев А.М., Дорофеев Э.Б., Антонов Е.Г. Управление кристаллизацией металла при сварке плавлением // *Сварочное производство*. – 1971. – № 11. – С. 10–15.

19. Болдырев А.М. Управление кристаллизацией металла шва при сварке плавлением: учеб. пособие / ВПИ. – Воронеж, 1980. – 88 с.

20. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – 170 с.

21. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. – М.: Металлургия, 1968. – 695 с.

22. Прохоров Н.Н., Мاستрюкова А.С. Первичная структура и ее значение при оценке прочности металла шва // *Автоматическая сварка*. – 1965. – № 8. – С. 15–21.

23. Петров Л.Г. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1974. – 375 с.

References

1. Krivososova E.A., Shchitsyn Iu.D., Trushnikov D.N., Akulova S.N., Myshkina A.V., Neulybin S.D., Dushina A.Iu. Razrabotka tekhnologii posloinogo vyrashchivaniia zagotovki iz vysokolegirovannoi stali metodom plazmennoi naplavki [Development of technology for layer-by-layer growth of high-alloyed steel billets by plasma surfacing]. *Metallurg*, 2019, no. 2, pp. 70–77.

2. Shchitsyn Iu.D. et al. Razrabotka tekhnologii posloinogo vyrashchivaniia zagotovki iz vysokolegirovannoi stali metodom plazmennoi naplavki [Development of technology for layer-by-layer growth of high-alloyed steel billets by plasma surfacing]. *Metallurg*, 2017, no. 5, pp. 73–77.

3. Shchitsyn Yu.D. et al. Development of Layered Growth Technology for a Workpiece of Highly Alloyed Steel by Plasma Surfacing. *Metallurgist*, 2017, vol. 61, no. 5-6, pp. 418–423.

4. Aristov S.V., Russo V.L. Kristallizatsiia metalla shva pri nizkochastotnykh kolebaniikh rasplava [Crystallization of weld metal at low-frequency vibrations of the melt]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1982, no. 11, pp. 42–44.

5. Krivososova E.A., Schitsin Yu.D., Trushnikov D.N., Myshkina S.N., Akulova A.V., Neulybin S.D., Dushina A.Yu. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys. *Metallurgist*, 2019, vol. 63, no. 1–2, pp. 197–205. DOI 10.1007/s11015-019-00810-1

6. Shchitsyn Y.D., Terentev S.A., Neulybin S.D., Artyomov A.O. Formation of 04Cr18Ni9 steel structure and properties during additive manufacturing of blanks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, iss. 9–12, pp. 3719–3723.

7. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma treatment of metals with reverse polarity current]. *Svarka i diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42–45.

8. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr18Ni8Ti on low-alloy steel 09Mg2Si. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 41103–41109.

9. Sutyurin G.V. Issledovanie mekhanizma vozdeistviia nizkochastotnoi vibratsii na kristallizatsiiu svarochnoi vanny [Study of the mechanism of low-frequency vibration effect on weld pool crystallization]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1975, no. 5, pp. 7–9.

10. Colegrove P.A. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling et al. *Journal Mater. Process. Technol.*, 2013, vol. 213, pp. 1782–1791.

11. Petrov A.V., Birman U.I. Kristallizatsiia metalla shva pri impul'sno-dugovoi svarke [Crystallization of weld metal in pulsed arc welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1968, no. 6, pp. 1–3.

12. Neulybin S.D. Vliianie poliarnosti toka na svoistva sloistykh materialov, poluchaemykh mnogoslainoi plazmennoi naplavkoi [Influence of current polarity on the properties of layered materials produced by multilayer plasma surfacing]. PhD. theses. Perm', 2017, 135 p.

13. Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka stali [Metallurgy and heat treatment of steel]. Ed. M.L. Bernshteina, A.G. Rakhshadt. 3nd. Moscow: Mashnostroenie, 1983, 352 p

14. Shlykov E., Abylaz T., Muratov K. Ensuring the accuracy of wire-cutting EDM processing of products made of hard-to-handle materials. *Obrabotka Metallov – Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 6–17.

15. Ol'shanskaia T.V. Konstruktsionnye materialy. Svarivaemost' i svarka: ucheb. Posobie [Construction materials. Weldability and welding]. Perm': Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2015, 241 p.

16. V.N. Volchenko, E.L. Makarov, V.V. Ship et al. Svarka i svarivaemye materialy. Vol. 1. Svarivaemost' materialov [Weldability of metals]. Ed. E.L. Makarova. Moscow: Metallurgiiia, 1991, 528 p.

17. Dushina A.Iu., Karabatova U.A., Ol'shanskaia T.V., Fedoseeva E.M. Osobennosti kristallizatsii austenitnykh stali pri additivnom proizvodstve [Peculiarities of crystallization of austenitic steels in additive manufacturing]. *Khimiia, ekologiia, urbanistika*, 2020, vol. 1, pp. 324–328.

18. Boldyrev A.M., Dorofeev E.B., Antonov E.G. Upravlenie kristallizatsiei metalla pri svarke plavleniem [Control of metal crystallization during fusion welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1971, no. 11, pp. 10–15.

19. Boldyrev A.M. Upravlenie kristallizatsiei metalla shva pri svarke plavleniem: ucheb. posobie [Control of weld metal crystallization in fusion welding]. *VPI. Voronezh*, 1980, 88 p.

20. Vaingard U. Vvedenie v fiziku kristallizatsii metallov [Introduction to the Physics of Metal Crystallization]. Moscow: Mir, 1967, 170 p.

21. Prokhorov N.N. Fizicheskie protsessy v metallakh pri svarke [Physical processes in metals during welding. Physical processes in metals during welding.]. Moscow: Metallurgii, 1968, 695 p.

22. Prokhorov N.N., Mastriukova A.S. Pervichnaia struktura i ee znachenie pri otsenke prochnosti metalla shva [Primary structure and its importance in assessing the strength of weld metal]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1965, no. 8, pp. 15–21.

23. Petrov L.G. Teoriia svarochnykh protsessov [Welding process theory]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1974, 375 p.

Получено 21.04.2021

Опубликовано 25.06.2021

Сведения об авторах

Душина Алена Юрьевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель, аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: alena@pstu.ru.

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: tvo66@mail.ru.

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой сва-

рочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: svarka@pstu.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Института механики сплошных сред, филиала Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН, e-mail: sn-1991@mail.ru.

Никкулин Роман Германович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: nikromonger.ro@gmail.com.

About the authors

Alena Yu. Dushina (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: alena@pstu.ru.

Tatyana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: tvo66@mail.ru.

Yuri D. Shchitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head, Department of Welding Production, Metrology and Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: svarka@pstu.ru.

Sergei D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics, a branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, e-mail: sn-1991@mail.ru.

Roman G. Nikulin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: nikromonger.ro@gmail.com.