

Щицын Ю.Д., Неулыбин С.Д., Белинин Д.С. и др. Влияние ультразвукового воздействия в процессе цикла наплавки на свойства и структуру наплавленного металла из стали 12Х18Н10Т // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 23–30. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.03

Shitsyn Yu.D., Neulybin S.D., Belinin D.S. et al. Influence of ultrasound impact in the process of the stacking cycle, on the properties and structure of the surfaced metal from 12Cr18Ni10Ti STEEL // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 23–30. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.03

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 2, 2019**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.03

УДК 621.791

**Ю.Д. Щицын<sup>1</sup>, С.Д. Неулыбин<sup>1</sup>, Д.С. Белинин<sup>1</sup>, Р.Г. Никулин<sup>1</sup>, К.П. Карунакаран<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Индийский технологический институт, Мумбаи, Индия

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛА НАПЛАВКИ  
НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т**

Аддитивные технологии, или технологии послойного синтеза – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Общими задачами аддитивных технологий являются обеспечение надлежащей микроструктуры синтезированного материала и устранение дефектности. Использование присадочной проволоки в качестве рабочего материала позволяет избавиться от проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленной использованием порошковых систем. Изделия из нержавеющей хромоникелевых сталей находят широкое применение в самых различных отраслях промышленности. Основной задачей при аддитивных технологиях является обеспечение свойств слоистых материалов не ниже, чем у получаемых традиционными методами. Характерными дефектами слоистых материалов, полученных наплавкой, являются повышенная пористость, неметаллические включения, снижение пластичности, а для высоколегированных сталей – потеря специальных свойств. Это предопределило развитие исследований в области дополнительных технологических мер для повышения конечных свойств изделия. Широко известны методы, основанные на деформационном воздействии на зону наплавки.

Представлены результаты исследования влияния ультразвуковых колебаний на структуру и свойства наплавленной стали 12Х18Н10Т. Наплавка проволоки марки 12Х18Н10Т осуществлялась дуговой наплавкой неплавящимся электродом в среде защитного газа аргона. Установлено, что ультразвуковое воздействие оказывает влияние на конечный размер зерна, структурообразование и твердость, а также на геометрию наплавленного слоя. Исследования показывают, что использование ультразвуковых колебаний в процессе наплавки может быть применено при проектировании оборудования для реализации процессов аддитивного производства.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, наплавка, деформационное упрочнение, ультразвуковое воздействие, высоколегированная сталь, балл зерна, микроструктура, металлографические исследования, микротвердость, зона термического влияния.

**Yu.D. Shitsyn<sup>1</sup>, S.D. Neulybin<sup>1</sup>, D.S. Belinin<sup>1</sup>, R.G. Nikulin<sup>1</sup>, K.P. Karunakaran<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Indian Institute of Technology, Mumbai, India

**INFLUENCE OF ULTRASOUND IMPACT IN THE PROCESS OF THE STACKING CYCLE, ON THE  
PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE SURFACED METAL FROM 12CR18NI10TI STEEL**

Additive technologies or layered synthesis technologies are one of the most dynamically developing areas of "digital" production. A common problem of additive technologies is to ensure the proper microstructure of the synthesized material and the elimination of defects. The use of filler wire as a working material allows you to get rid of the problems associated with the low productivity of existing methods, the high cost of equipment used, the limited types of materials used, due to the use of powder systems. Products made of stainless chromium-nickel steels are widely used in various industries. The main problem with additive technologies is to ensure the properties of laminates not lower than those obtained by traditional methods. Characteristic defects of laminated materials obtained by surfacing are increased porosity, non-metallic inclusions, a decrease in ductility, and for high-alloy steels, a loss of special properties. This predetermined the development of research in the field of additional technological measures to improve the final properties of the product. Widely known methods based on the deformation effect on the surfacing zone. This paper presents the results of a study of the effect of ultrasonic vibrations on the structure and properties of the deposited steel 12Cr18Ni10Ti. The welding of wire grade 12Cr18Ni10Ti was carried out by arc welding with a non-consumable electrode in a protective argon gas medium. It was found that ultrasonic influence has an effect on the final grain size, structure formation and hardness, as well as on the geometry of the deposited layer. Studies show that the use of ultrasonic vibrations in the process of surfacing can be applied in the design of equipment for the implementation of processes of additive production.

**Keywords:** additive technologies, surfacing, strain hardening, ultrasonic action, high-alloy steel, grain score, microstructure, metallographic studies, microhardness, heat-affected zone.

В современном машиностроении одним из путей, направленных на повышение надежности и долговечности выпускаемой продукции, является создание и применение новых энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки материалов и изготовления деталей [1]. В последние годы широкое распространение получают аддитивные технологии, однако их широкое внедрение в производство сдерживается недостаточной изученностью влияния послойного наложения металла на свойства готовых изделий, отсутствием технологических рекомендаций по получению бездефектной структуры и требуемых механических свойств. Это предопределило необходимость поиска технологических приемов, обеспечивающих получение необходимых свойств металла изделий при аддитивном производстве [2, 3].

Получение мелкозернистой структуры наплавленного металла позволяет, как показывает практика, обеспечить высокие механические свойства сварного соединения, а также повысить технологическую прочность, коррозионную стойкость и другие специальные свойства, увеличивая ресурс работы изделия в целом [4–6]. Одним из механизмов модификации наплавленного металла представляется использование различных воздействий на жидкую ванну в процессе наплавки [7].

Существующие особенности кристаллизации литого металла при сварке и наплавке позволяют установить периодичность гармонического характера при затвердевании металла [8]. Часть исследователей считают основной причиной, вызывающей цикличность кристаллизации, выделение скрытой теплоты плавления, тормозящей продвижение фронта затвердевания, другие – концентрационное переохлаждение перед межфазной границей, третьи – периодический подвод тепла к границе. Однако единого мнения пока не сложилось [9–12].

На сегодняшний день известен ряд технологических приемов, позволяющих воздействовать на кристаллизацию металла при сварке и наплавке, с целью получения измельченной структуры [13, 14]. С этой целью используют вибрацию сварного изделия, ввод энергии от импульсного источника нагрева, импульсную подачу присадочной проволоки в различных пространственных положениях, применение источников с модуляцией сварочного

тока, воздействующего на жидкий металл хвостовой части ванны, а также в ряде случаев ввод отдельных тепловых источников, влияющих на зону термического влияния около осевой линии шва, внешнее электромагнитное воздействие на расплав как в непрерывном режиме, так и пульсирующее с различной частотой магнитного поля и т.д. [15].

Одни авторы связывали условия образования структуры металла шва с влиянием подвода тепла к фронту затвердевания. Другие исследователи полагали, что колебания жидкого металла сварочной ванны играют важную роль в структурообразовании [16–18].

Для изготовления ответственных конструкций наиболее часто среди высоколегированных сталей используется сталь марки 12X18H10T. Это объясняется тем, что аустенитные хромоникелевые стали, к которым относится сталь марки 12X18H10T, обладают высокой пластичностью и ударной вязкостью, высокими механическими свойствами при отрицательных значениях температуры, устойчивостью против окисления на воздухе и в атмосфере продуктов сгорания топлива при температуре ниже 900 °С, хорошей свариваемостью. Однако при уникальном комплексе физико-механических свойств исследуемая сталь имеет ряд недостатков: сравнительно невысокие прочность и твердость, подверженность сварных швов межкристаллитной коррозии [19].

В работе предложен метод повышения качества наплавленных слоев из стали 12X18H10T при послойной аргонодуговой наплавке при аддитивном производстве деталей. Для исследования возможностей модифицирования структуры применяли ультразвуковое воздействие на наплаваемый материал с помощью волновода, подведенного к нижней поверхности пластины.

Аргонодуговую наплавку производили на пластины стали 12X18H10T толщиной 3 мм на установке с инверторным источником питания. Аргонодуговую наплавку проводили по режиму, приведенному в табл. 1. Волновод подведен снизу пластины.

Авторами исследования было установлено [20], что наиболее благоприятное влияние ультразвуковое воздействие оказывает на расстоянии 30 мм от волновода (рис. 1, позиция 3). Для оценки

Таблица 1

Режим аргонодуговой наплавки

Ток наплавки, А	Расход аргона, л/мин	Скорость подачи, мм/мин	Частота ультразвукового воздействия, кГц	Расстояние от образца до среза сопла горелки <i>h</i> , мм
120	7	200	22	10

влияния ультразвука выполнили наплавку образцов на одном режиме без ультразвукового воздействия (образец № 1) и с ультразвуковым воздействием (образец № 2).

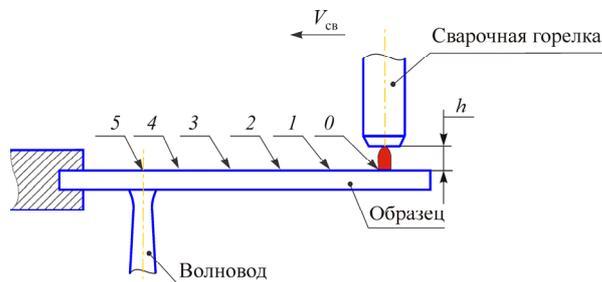


Рис. 1. Схема процесса наплавки

Исследование макроструктуры показало, что дефектов (трещин, пор, несплавлений и др.) в наплавленном металле и зоне термовлияния на макрошлифах нет. Макроструктура металла наплавки в обоих случаях транскристаллитная. Вид формирования металла наплавки и зоны термовлияния приведен на рис. 2, 3. Результаты замеров параметров швов наплавки приведены в табл. 2.

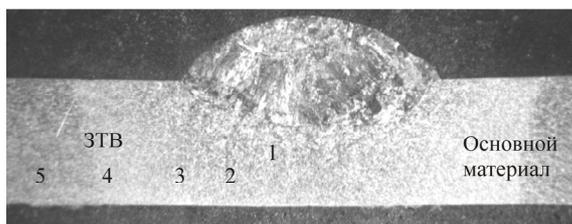


Рис. 2. Вид формирования металла наплавки и ЗТВ на макрошлифах исследуемых образцов без УЗ-воздействия

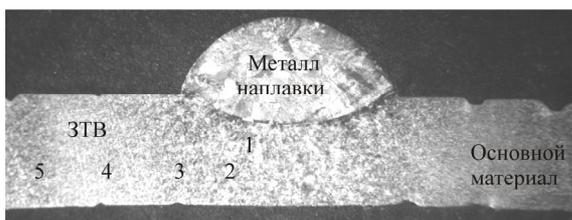


Рис. 3. Вид формирования металла наплавки и ЗТВ на макрошлифах исследуемых образцов с УЗ-воздействием

Таблица 2

Результаты замеров параметров швов наплавки исследуемых образцов

Номер образца	Параметры шва наплавки, мм			Ширина зоны термовлияния, мм
	Ширина шва	Усиление	Глубина проплавления	
1	5,6	2,1	0,7	3,3
2	6,1	1,5	1,0	2,5

Исследование микроструктуры показало следующее. При наплавке без ультразвукового воздействия микроструктура металла наплавки гетерогенная, с выделениями  $\delta$ -феррита, в основном по направлению роста кристаллитов (рис. 4). Внутри кристаллитов микроструктура аустенитно-ферритная, представляет собой структуру типа корзиночного плетения – пакеты зерен реечного типа с различным направлением реек (см. рис. 4). В межслойных участках имеются скопления зерен с геометрией, отличной от реечной: отдельные мелкие зерна со структурой, близкой к равноосной, и более крупные зерна неправильной геометрической формы (см. рис. 4). У границы сплавления в металле наплавки имеется светлая, слаботравящаяся зона шириной до  $\sim 0,25$  мм. Микроструктура в этой зоне крупнозернистая, с внутризерненным игольчатым строением (рис. 5).

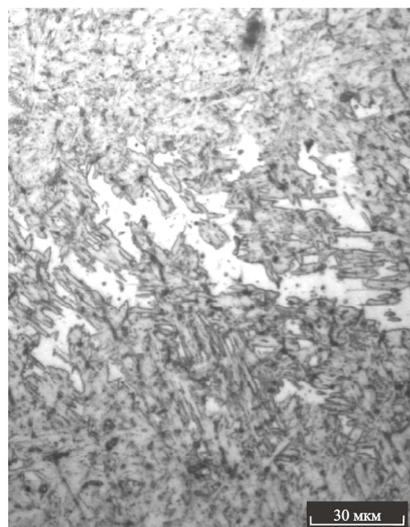
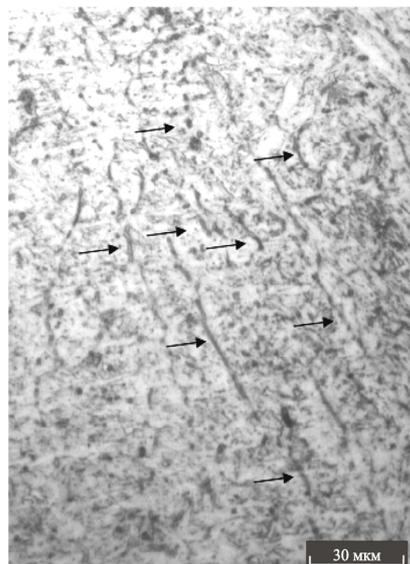


Рис. 4. Микроструктура металла наплавки образца № 1,  $\times 500$ . Стрелками указан  $\delta$ -феррит

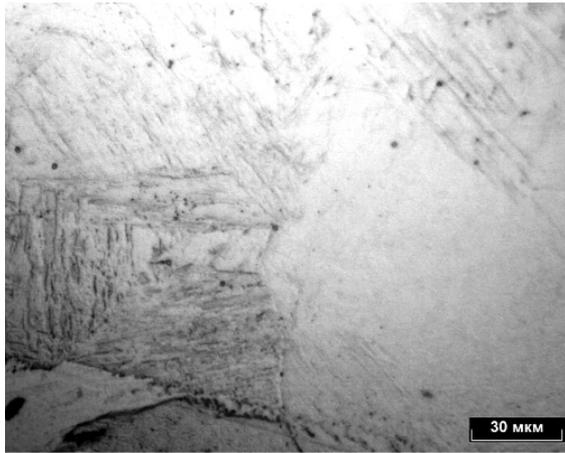


Рис. 5. Вид микроструктуры наплавленного металла образца № 1 у границы сплавления,  $\times 500$

Микроструктура основного материала со следами пластической деформации (зерно немного вытянуто в направлении проката), размер зерна соответствует 8-му баллу (рис. 6). В зоне термовлияния у границы сплавления с металлом наплавки наблюдается рост зерна. Непосредственно у границы сплавления примерно на величину зерна наблюдается полоса с ферритной структурой (см. рис. 6). Далее структура ферритно-бейнитная, феррит выделился по границам зерна и телу зерна с игольчатым формированием по типу видманштеттовой структуры. Далее по мере удаления от границы сплавления зерно становится равноосным, наблюдается измельчение зерна (до 9–10-го баллов) с формированием ферритно-перлитной структуры.

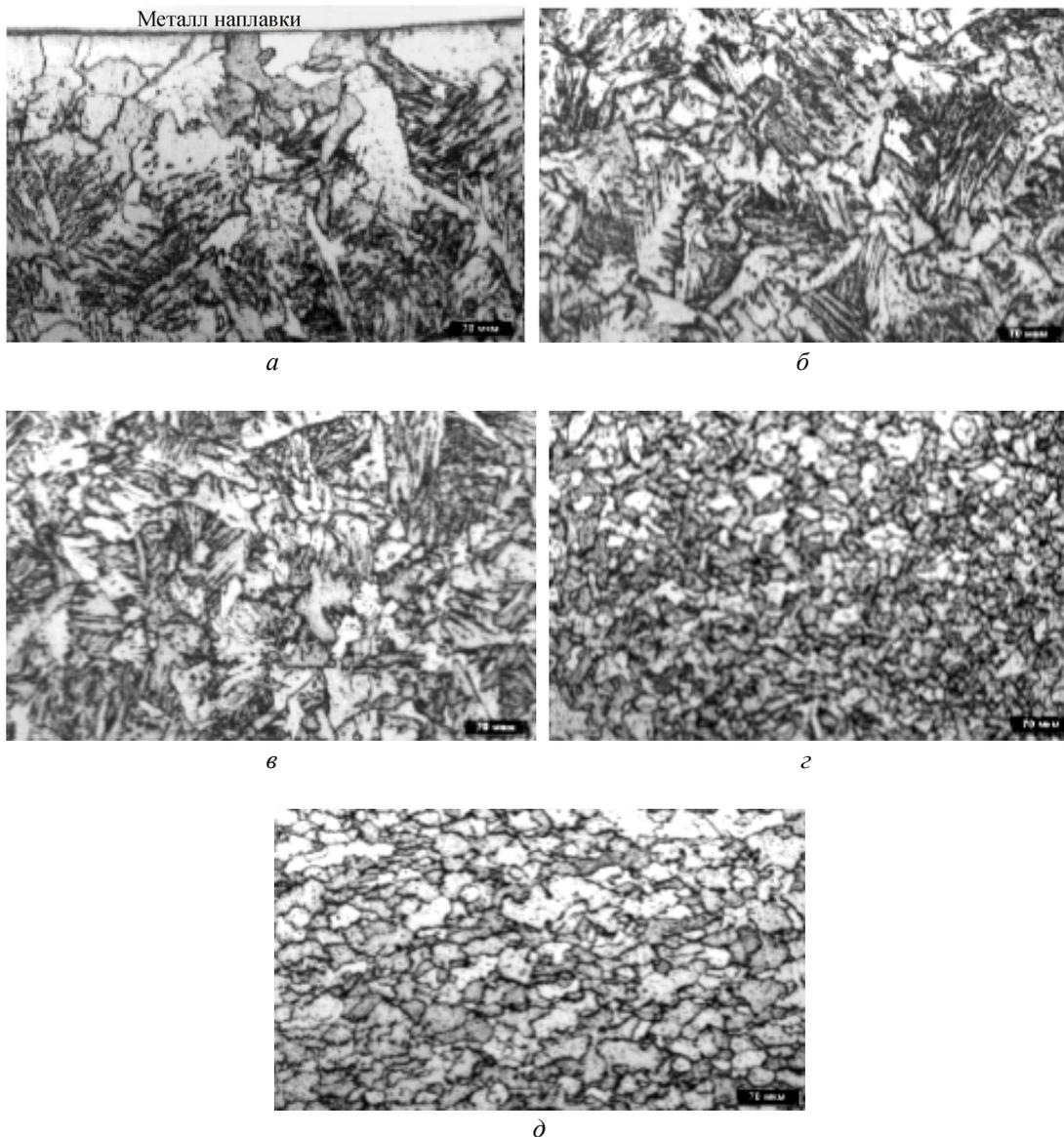


Рис. 6. Микроструктура зоны термовлияния и основного материала образца № 1,  $\times 200$ : *a* – участок 1 (ЗТВ), 2–3-й балл зерна; *б* – участок 2 (ЗТВ), 2–3-й балл зерна; *в* – участок 3 (ЗТВ), 3–4-й балл зерна; *г* – участок 4 (ЗТВ), 9–10-й балл зерна; *д* – участок 5 (основной материал), 8-й балл зерна

При наплавке с ультразвуковым воздействием микроструктура металла наплавки гетерогенная, предположительно аустенитно-ферритная с выделениями карбидной фазы, представляет собой структуру типа корзиночного плетения – пакеты зерен реечного типа с различным направлением реек (рис. 7). В зоне термовлияния у границы

сплавления рост зерна менее выражен (максимально 5-й балл), полосы сплошной ферритной структуры нет (рис. 8). Характер изменения структуры в зоне термовлияния в целом аналогичен образцу № 1 с отличиями в размере зоны термовлияния и величины зерна по характерным зонам ЗТВ (рис. 9).

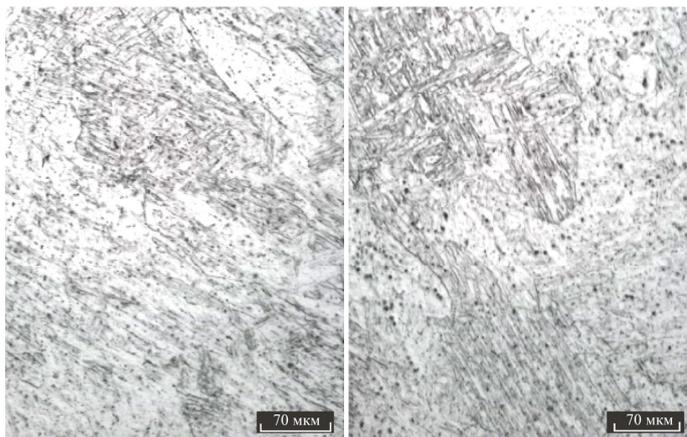


Рис. 7. Микроструктура наплавленного металла образца № 2, ×500

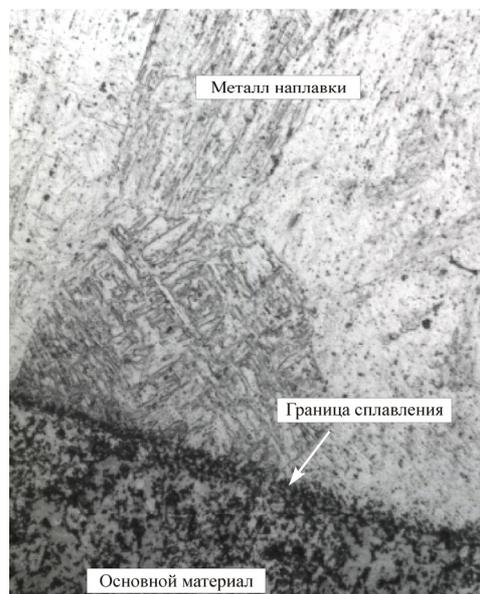
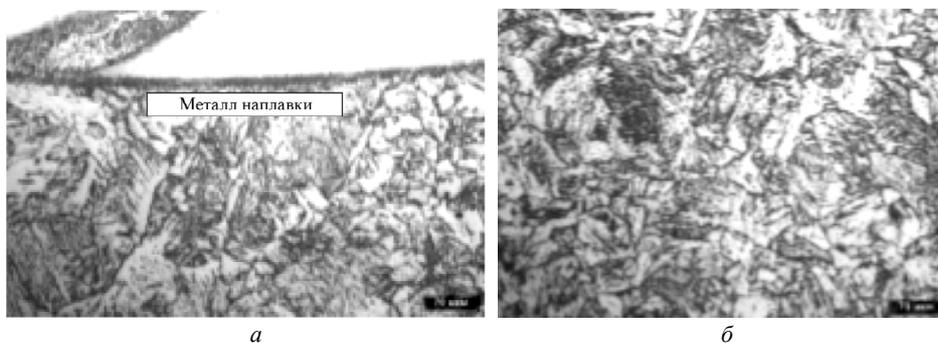
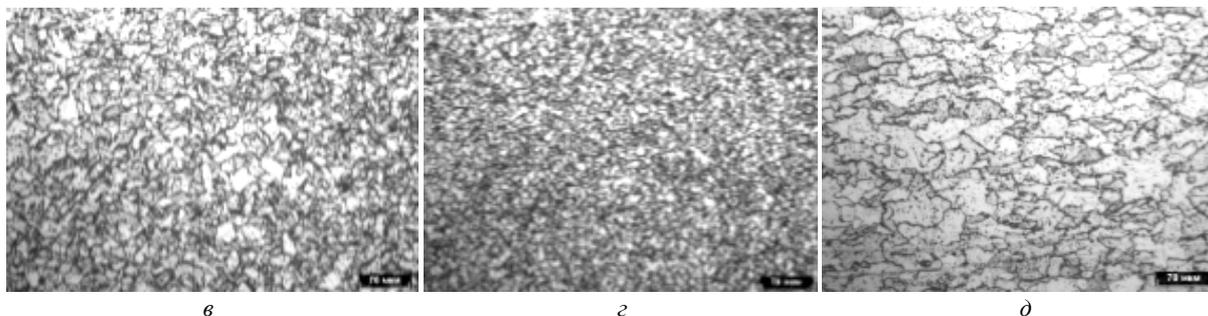


Рис. 8. Вид микроструктуры наплавленного металла образца № 1 у границы сплавления, ×500



а

б



в

г

д

Рис. 9. Микроструктура зоны термовлияния и основного материала образца № 5, ×200: а – участок 1 (ЗТВ), 5-й балл зерна; б – участок 2 (ЗТВ), 5-й балл зерна; в – участок 3 (ЗТВ), 9-й балл зерна; г – участок 4 (ЗТВ), 11-й балл зерна; д – участок 5 (основной материал), 8-й балл зерна

При проведении исследований по измерению микротвердости наплавленного слоя предполагалось, что измельчение зерна может привести к росту значений микротвердости для образца, выполненного с УЗ-воздействием. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты замеров микротвердости

№ п/п	Место измерения твердости	Микротвердость $H_{\mu 50}$ , кгс/мм <sup>2</sup>
1	Образец 1 (наплавленный материал)	268–290
2	Образец 2 (наплавленный материал)	305–338
3	Основной материал	118–137

**Выводы**

1. Рассмотрено влияние ультразвуковых колебаний, накладываемых в процессе аргонодуговой наплавки стали 12X18H10T, на структуру и свойства наплавленного металла.

2. Показано, что УЗ-колебания оказывают благоприятное воздействие на структурообразование в металле наплавки, а также ЗТВ. Установлено, что достигается уменьшение размера зерна при УЗ-воздействии на 2–3 балла.

3. Отмечается увеличение твердости наплавленного слоя с применением УЗ-колебаний до 10 % по отношению к режимам обработки без дополнительного воздействия.

4. Результаты исследования могут быть применены при разработке технологий аддитивного производства изделий ответственного назначения из высоколегированных сталей.

*Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки Пермского края в рамках соглашения С-26/795 от 21.12.2017, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук.*

**Список литературы**

1. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review // J. of Materials Eng. and Perform. – 2014. – Vol. 23, iss. 6. – P. 1917–1928. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

2. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. – Киев: Техніка, 1968. – 312 с.

3. Адам П. Сварка высоколегированных сплавов для газовых турбин // Жаропрочные сплавы для газовых турбин. – М.: Металлургия. 1981. – С. 388–408.

4. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сва-

рочной ванны // Автоматическая сварка. – 1975. – № 5. – С. 7–9.

5. Аристов С.В., Руссо В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Сварочное производство. – 1982. – № 11. – С. 42–44.

6. Wire + arc additive manufacturing / S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // Mater. Sci. Technol. – 2016. – No. 32. – P. 641–647. DOI: [dx.doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073](https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073)

7. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2015. – No. 81. – P. 465–481. DOI: [dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3)

8. Петров А.В., Бирман У.И. Кристаллизация металла шва при импульсно-дуговой сварке // Сварочное производство. – 1968. – № 6. – С. 1–3.

9. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components / P.A. Colegrove, J. Donoghue, F. Martina, J. Gu, P. Prangnell, J. Hönnige // Scr. Mater. – 2017. – No. 135. – P. 111–118, DOI: [dx.doi.org/10.1016/j](https://doi.org/10.1016/j)

10. Residual stress characterization and control in the additive manufacture of large scale metal structures / J.R. Hönnige, S. Williams, M.J. Roy, P. Colegrove, S. Ganguly // Materials Research Proc. – 2017. – Vol. 2. – P. 455–460. – URL: <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291173-77>.

11. Исследование влияния виброобработки в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 09Г2С / Р.Г. Ризванов, А.М. Файрушин, А.Л. Карпов, М.З. Зарипов // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 5. – С. 183–186.

12. Xie Y., Zhang H., Zhou F. Improvement in geometrical accuracy and mechanical property for arc-based additive manufacturing using metamorphic rolling mechanism // J. Manuf. Sci. Eng. – 2015. – No. 138. DOI: [dx.doi.org/10.1115/1.4032079](https://doi.org/10.1115/1.4032079)

13. Elmer J.W., Allen S.M., Eagar T.W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys // Met. Trans. – October 1989. – Vol. 20A. – P. 2117–2131.

14. Allan G. Castability solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels // Europ. Commission, EUR 13941-Steelmaking. – 1997. – P. 85.

15. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V / J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell // Mater. Charact. – April 2016. – Vol. 114. – P. 103–114. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.02.001)

16. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing / Yicha ZHANG, Alain Bernard, Ramy Harik, K.P. Karunakaran // J. of Intelligent Manuf. – 2015. – Vol. 5. – P. 34–48.

17. Hybrid Layered Manufacturing using Tungsten Inert Gas Cladding / Sajan Kapil, Fisseha Legesse, Pravin Milind Kulkarni, Prathmesh Joshi, Ankit Desai, K.P. Karunakaran // Prog. in Add. Manuf. – 2016. – Vol. 1(1). – P. 79–91.

18. Нехорошков О.Н. Влияние ультразвуковой обработки на структуру, свойства и разрушение композиций, образующихся при нанесении покрытий и сварке: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Томск, 2015. – С. 6–8.

19. Алов А.А., Виноградов В.С. Повышение качества металла сварных швов // Сварочное производство. – 1957. – № 7. – С. 9–10.

20. 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.

### References

1. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Perform.*, 2014, vol. 23, iss. 6, pp. 1917–1928. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

2. Kakhovskii N.I. *Svarka nerzhavieushchikh staley* [Stainless Steel Welding]. Kiev: Tekhnika, 1968, 312 p.

3. Adam P. *Svarka vysokolegированных сплавов для газовых турбин* [Welding of high-alloy alloys for gas turbines]. *Zharoprochnye splavy dlia gazovykh turbin*. Moscow: Metallurgiya. 1981, pp. 388–408.

4. Sutyryn G.V. *Issledovanie mekhanizma vozdeistviia nizkочастотnoi vibratsii na kristallizatsiiu svarочноi vannы* [Investigation of the mechanism of low-frequency vibration influence on the welded bath crystallization]. *Avtomaticheskaya svarka*, 1975, no. 5, pp. 7–9.

5. Aristov S.V., Russo V.L. *Kristallizatsiia metalla shva pri nizkочастотnykh kolebaniyakh rasplava* [Seam metal crystallization at low-frequency melt vibrations]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1982, no. 11, pp. 42–44.

6. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science Technology*, 2016, no. 32, pp. 641–647. DOI: [dx.doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073](https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073)

7. Ding D., Pan Z., Cuiui D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, no. 81, pp. 465–481. DOI: [dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3)

8. Petrov A.V., Birman U.I. *Kristallizatsiia metalla shva pri immul'sno-dugovoi svарке* [Crystallization of weld metal during inull-arc welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1968, no. 6, pp. 1–3.

9. Colegrove P.A., Donoghue J., Martina F., Gu J., Prangnell P., Hönnige J. Application of bulk deformation methods for micro-structural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scripta Materialia*, 2017, no. 135, pp. 111–118, DOI: [dx.doi.org/10.1016/j](https://doi.org/10.1016/j)

10. Hönnige J.R., Williams S., Roy M.J., Colegrove P., Ganguly S. Residual stress characterization and control in the additive manufacture of large scale metal structures. *Materials Research Proceedings*, 2017, vol. 2, pp. 455–460. – URL: <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291173-77>.

11. Rizvanov R.G., Fairushin A.M., Karpov A.L., Zaripov M.Z. *Issledovanie vliianiia vibroobrabotki v pro-*

*tesse svarki na svoistva svарnykh soedinenii neftegazovogo oborudovaniia iz stali 09G2S* [Investigation of the influence of vibro-treatment in the welding process on the properties of welded joints of oil and gas equipment made of 09G2S steel]. *Neftegazovoe delo*, 2007, no. 5, pp. 183–186.

12. Xie Y., Zhang H., Zhou F. Improvement in geometrical accuracy and mechanical property for arc-based additive manufacturing using metamorphic rolling mechanism. *Journal Manuf. Sci. Eng.*, 2015, no. 138. DOI: [dx.doi.org/10.1115/1.4032079](https://doi.org/10.1115/1.4032079)

13. Elmer J.W., Allen S.M., Eagar T.W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys. *Met Trans.*, October 1989, vol. 20A, pp. 2117–2131.

14. Allan G. Castability solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels. *Europ. Commission, EUR 13941-Steelmaking*, 1997, pp. 85.

15. Donoghue J., Antonysamy A.A., Martina F., Colegrove P.A., Williams S.W., Prangnell P.B. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V. *Mater. Charact.* April 2016, vol. 114, pp. 103–114. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.02.001)

16. Yicha ZHANG, Alain Bernard, Ramy Harik, Karunakaran K.P. Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, vol. 5, pp. 34–48.

17. Sajjan Kapil, Fisseha Legesse, Pravin Milind Kulkarni, Prathmesh Joshi, Ankit Desai, Karunakaran K.P. Hybrid Layered Manufacturing using Tungsten Inert Gas Cladding. *Prog. in Add. Manuf.*, 2016, vol. 1(1), pp. 79–91.

18. Nekhoroshkov O.N. *Vliianie ul'trazvukovoi obrabotki na strukturu, svoistva i razrushenie kompozitsii, obrazuiushchikhsia pri nanenii pokrytii i svарке* [Influence of ultrasonic treatment on structure, properties and destruction of compositions formed during coating and welding]. Abstract of Ph.D. thesis. Tomsk, 2015, pp. 6–8.

19. Алов А.А., Виноградов В.С. *Povyshenie kachestva metalla svарnykh shvov* [Improvement of weld metal quality]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1957, no. 7, pp. 9–10.

20. Krivonosova E.A., Shchitsyn Yu.D., Trushnikov D.N., Akulova S.N., Myshkina A.V., Neulybin S.D., Dushina A.Iu. *Razrabotka tekhnologii posloinogo vyrashchivaniia zagotovki iz vysokolegированной stali metodom plazmennoi naplavki* [Development of technology of layer-by-layer growth of billets made of high-alloy steel by the method of plasma cladding]. *Metallurg*, 2019, no. 2, pp. 70–77.

Получено 26.02.19

Опубликовано 20.06.19

### Сведения об авторах

**Щицын Юрий Дмитриевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: [svarka@pstu.ru](mailto:svarka@pstu.ru).

**Неулыбин Сергей Дмитриевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, младший научный сотрудник

ник кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

**Белинин Дмитрий Сергеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

**Никулин Роман Германович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Карупасами Пулан Карунакара Пупати** (Мумбаи, Индия) – профессор, кандидат наук лаборатории быстрого производства Индийского технологического института; e-mail: karuna@iitb.ac.in.

#### About the authors

**Yuri D. Shitsyn** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of

Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

**Sergey D. Neulybin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Junior Researcher Sciences, Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

**Dmitry S. Belinin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.

**Roman G. Nikulin** (Perm, Russian Federation) – Graduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Material Technologies, Perm National Research Polytechnic University.

**Karupasami Pulan Karunakara Pupati** (Mumbai, India) – Professor, Ph.D. in Sciences, Rapid Production Laboratory, Indian Institute of Technology; e-mail: karuna@iitb.ac.in.