



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-56-63>
УДК 669.017:53;534.29–7/-8;621.791.92

Поступила 29.09.2025
Received 29.09.2025

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СТЕНКИ, НАПЛАВЛЕННЫЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ WAAM

В. В. РУБАНИК, В. Ф. ЛУЦКО, В. В. РУБАНИК мл., И. А. ШАКУРОВ, Д. П. ДРАБО, ГНУ
«Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь, пр. Генерала Людникова, 13.
E-mail: ita@vitebsk.by
Н. Н. РЕСНИНА, С. П. БЕЛЯЕВ, Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия, Университетская наб., 7

Приведены результаты исследований по влиянию ультразвуковых колебаний на микроструктуру и анизотропию свойств стальных образцов, полученных проволоочно-дуговой аддитивной наплавкой. Установлено, что ультразвуковые колебания подавляют формирование столбчатых зерен и кристаллографической текстуры, вызванной эпитаксиальным ростом от подложки. Рентгеноструктурный анализ подтвердил снижение интенсивности рефлекса (110) α -Fe в 1,5–3,0 раза без ультразвуковых колебаний, тогда как при ультразвуковых колебаниях структура приближается к изотропной. Результаты показывают эффективность ультразвуковых колебаний при управлении процессом наплавки WAAM.

Ключевые слова. Послойная электродуговая наплавка, ультразвуковые колебания, аддитивные технологии.

Для цитирования. Рубаник, В. В. Влияние ультразвуковых колебаний на стенки, наплавленные по технологии WAAM / В. В. Рубаник, В. Ф. Луцко, В. В. Рубаник мл., И. А. Шакуров, Д. П. Драбо, Н. Н. Реснина, С. П. Беляев // Литейное и металлургическое производство. 2025. № 4. С. 56–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-56-63>.

THE INFLUENCE OF ULTRASONIC VIBRATIONS ON WALLS DEPOSITED USING THE WAAM TECHNOLOGY

V. V. RUBANIK, V. F. LUTCKO, V. V. RUBANIK jr., I. A. SHAKUROV, D. P. DRABO, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Belarus, 13, Generala Lyudnikova ave.
E-mail: ita@vitebsk.by
N. N. RESNINA, S. P. BELYAEV, Saint-Petersburg State University,
Saint-Petersburg, Russia, 7, Universitetskaya Embankment

The results of a study examining the effect of ultrasonic vibrations (UT) on the microstructure and anisotropy of steel samples produced by wire-arc additive cladding are presented. UT suppresses the formation of columnar grains and crystallographic texture caused by epitaxial growth from the substrate. X-ray diffraction analysis confirmed a 1.5–3.0-fold decrease in the intensity of the (110) α -Fe reflection without UT, while with UT, the structure approaches isotropic. The results demonstrate the effectiveness of UT control in the WAAM cladding process.

Keywords. Layer-by-layer electric arc surfacing, ultrasonic vibrations, additive technologies.

For citation. Rubanik V. V., Lutcko V. F., Rubanik V. V. jr., Shakurov I. A., Drabo D. P., Resnina N. N., Belyaev S. P. The influence of ultrasonic vibrations on walls deposited using the WAAM technology. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 4, pp. 56–63. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-56-63>.

Введение

Проволоочно-дуговое аддитивное производство (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) – это метод направленного энергетического осаждения (Directed Energy Deposition, DED), использующий электрическую дугу для плавления расходуемой проволоки и послойного формирования заготовки.

Процесс WAAM характеризуется низкими энергозатратами, что связано с возможностью реализации технологии на базе стандартного сварочного оборудования [1]. Помимо экономичности, процесс WAAM обладает упрощенными технологическими требованиями. В отличие от методов на основе электронного луча [2] он не требует вакуумной среды, что исключает длительные простои на вакуумирование и снижает риск нежелательного воздействия, например старения, на материал [3]. Хотя для защиты расплава от атмосферного загрязнения необходим инертный газ (например, аргон), WAAM менее подвержен проблемам испарения и выгорания легирующих элементов по сравнению с электронно-лучевой сваркой в вакууме [4].

Важным технологическим преимуществом WAAM является энергетическая эффективность. Электрическая дуга обладает более высоким коэффициентом полезного действия тепловложения (до 85–90 %) по сравнению с лазерными источниками [5]. Это делает WAAM особенно выгодным с точки зрения энергопотребления при работе с высокоотражающими металлами, обладающими низким коэффициентом поглощения лазерного излучения, такими, как алюминий [6], медь и магний [7]. Наконец, по производительности WAAM демонстрирует конкурентоспособность: при типичной высоте слоя 1–2 мм и шероховатости поверхности порядка 500 мкм [8] технология обеспечивает скорость осаждения до 10 кг/ч, что сопоставимо с показателями лазерных и электронно-лучевых DED-систем при аналогичной материалоемкости.

Ключевой проблемой аддитивного производства металлических материалов является формирование столбчатых зерен, что, в свою очередь, приводит к выраженной кристаллографической текстуре [9–12]. Это обусловлено эпитаксиальным ростом зерен в направлении [001] за счет отвода теплоты подложкой. Столбчатые зерна растут через слои в высоту, достигая в методах DED диаметра в сотни микрон и длины в несколько миллиметров. Такая структура ухудшает механические свойства конструкционных сплавов (сталей, титановых) и функциональные свойства материалов с памятью формы. Показательно, что восстанавливаемая деформация образцов NiTi с памятью формы, произведенных методом WAAM, оказывается втрое ниже, чем у сплавов, полученных традиционными технологиями [13].

Для предотвращения образования столбчатой структуры разработаны несколько подходов. Так, прокатка после наплавки каждого слоя эффективно разрушает текстуру, но применима лишь к деталям простой геометрии [14–16]. Контроль охлаждения, изменяя термические градиенты, способствует измельчению зерна, однако провоцирует трещинообразование из-за высоких остаточных напряжений [17, 18]. Ультразвуковая обработка позволяет снижать как внутренние напряжения, так и размер получаемых зерен [19, 20] и может быть применима к получению деталей любой формы, однако эта перспективная технология не отработана, а влияние параметров ультразвуковой обработки при наплавке не установлено. Поэтому цель данной работы – исследование влияния ультразвуковой обработки при послойной электродуговой наплавке на структуру и свойства стальной стенки.

Методика проведения исследования

Для проведения исследования метода WAAM с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) спроектирована и создана лабораторная установка, включающая ультразвуковой генератор, акустическую систему, инверторный сварочный аппарат с механизмом подачи проволоки, пневмосистему, механизмы линейного перемещения (рис. 1, табл. 1).

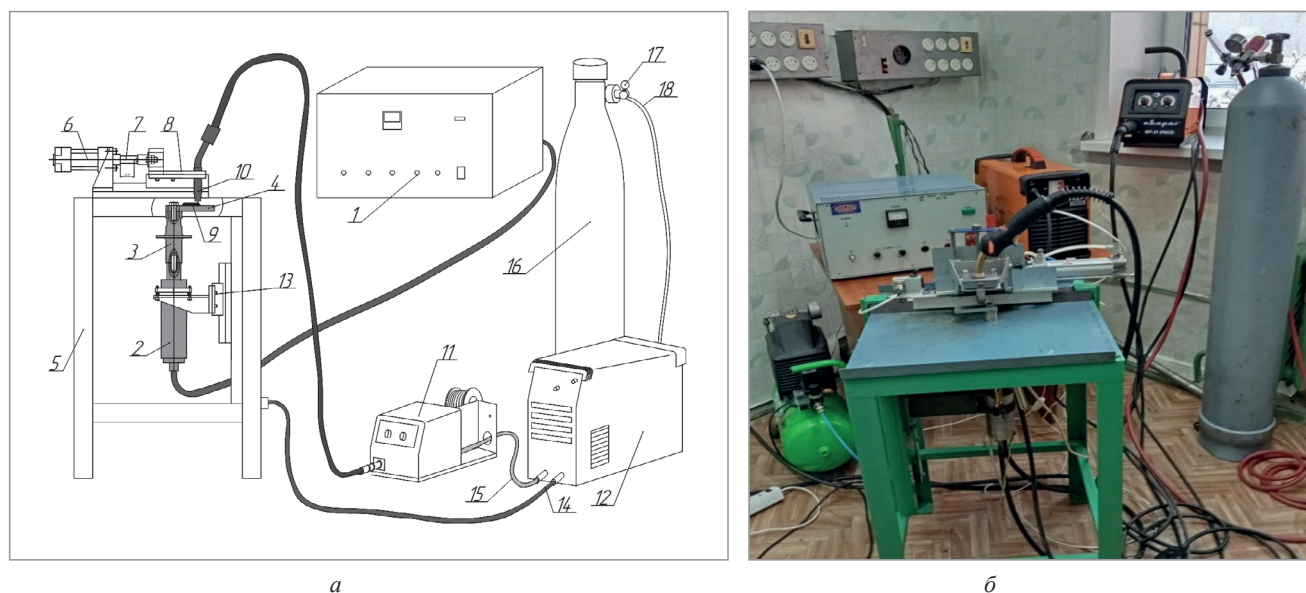


Рис. 1. Блок-схема (а) и вид (б) лабораторной установки послойной наплавки методом WAAM с наложением на подложку ультразвуковых колебаний

В качестве расходного электрода использовали омедненную стальную проволоку марки СВ-08-Г2С диаметром 0,8 мм. Наплавку производили на подложку из стали Ст3, закрепленную на волноводе с помощью болтового соединения (рис. 2).

Таблица 1. Перечень основных частей установки

Номер позиции на рис. 1	Наименование
1	Ультразвуковой генератор
2	Магнитострикционный преобразователь
3	Волновод-излучатель
4	Подложка
5	Станина
6	Пневмоцилиндр
7	Шток пневмоцилиндра
8	Механизм линейного перемещения горелки
9	Наплавленный металл
10	Горелка
11	Подающее устройство
12	Источник питания
13	Механизм линейного перемещения акустической системы
14	Клемма заземления
15	Кабель управления
16	Баллон с газом
17	Редуктор
18	Газовый шланг



Рис. 2. Вид крепления к волноводу подложки, на которой наплавлена стенка по технологии послойной наплавки

Наплавку осуществляли в защитной среде аргона со скоростью наплавки 0,75 м/мин, скоростью подачи проволоки 6 м/мин, напряжением 4,5 В, давлением подачи газа 1,2 МПа. Между нанесением слоев выдерживали время остывания 2 мин. Ультразвуковое воздействие применяли непосредственно в процессе наплавки с использованием ультразвукового генератора частотой 20 кГц и мощностью 1 кВт.

Микроструктуру образцов исследовали методом оптической микроскопии на микроскопе Микро-200. Фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-2.

Основные результаты

При ультразвуковой наплавке испытаны два режима (№ 1 и 2), отличающиеся распределением амплитуды УЗК по длине подложки (рис. 3). В режиме № 1 минимальная амплитуда составила 4 мкм, а максимальная – 6 мкм. В режиме № 2 эти значения составляли 3 и 1 мкм соответственно.

Образцы, наплавленные при повышенной амплитуде УЗК, демонстрировали разбрызгивание металла и формирование неровных слоев (рис. 4, а). В образцах, наплавленных при сниженной амплитуде УЗК (режим № 2), наблюдали аналогичные дефекты, однако менее выраженные (рис. 4, б). Поэтому для формирования стенки высотой ~30 мм выбран режим № 2.

Изготовлены 36-слойные стенки как с применением ультразвука, так и без него (рис. 5). Видно, что образец, наплавленный без ультразвука, имеет одинаковую высоту (рис. 5, а), тогда как в образце, наплавленном под действием ультразвука, высота меняется (рис. 5, б). Это связано с тем, что амплитуда УЗК влияет на угол смачивания, что, в свою очередь, влияет на высоту слоя. Поскольку существует распределение амплитуды по длине подложки, то это определяет неодинаковую толщину слоев по длине образца и ведет к формированию стенки с неодинаковой высотой.



Рис. 3. Распределение амплитуд ультразвуковых колебаний по длине подложки

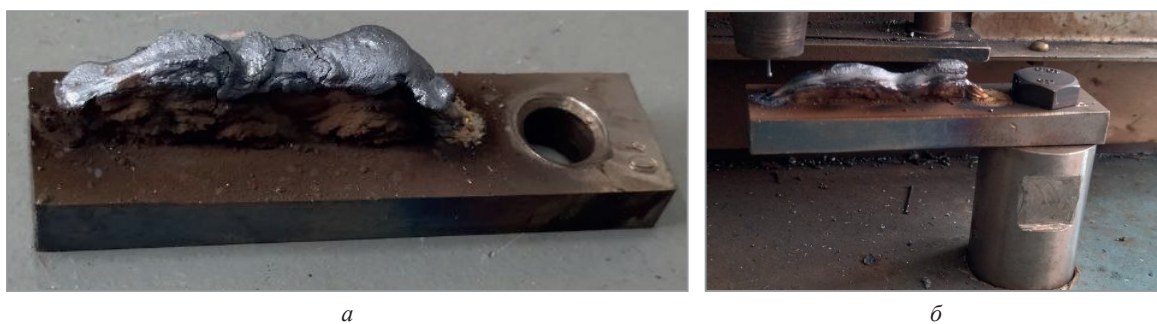
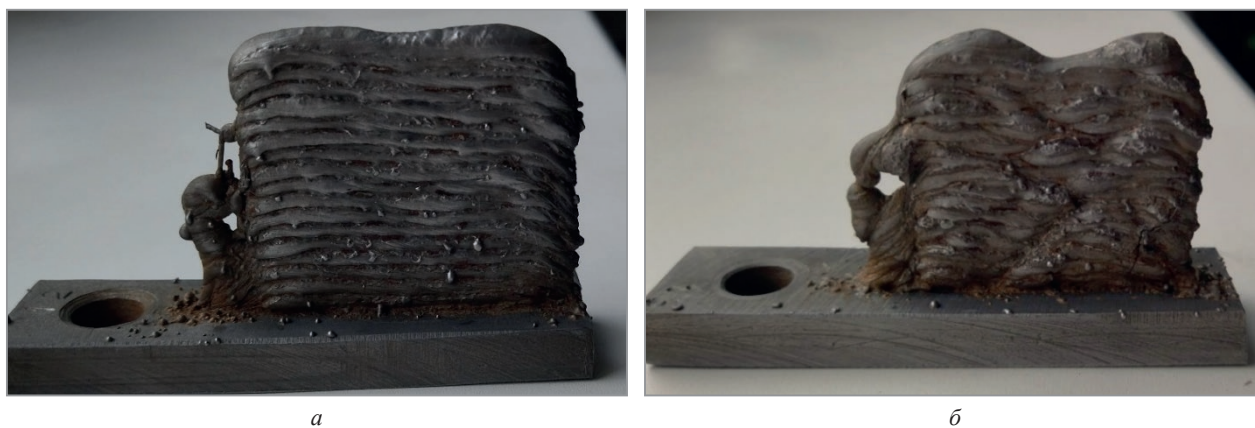


Рис. 4. Вид стенки, наплавленной при режиме: а – № 1; б – № 2

Рис. 5. Вид образцов, полученных по технологии послойной наплавки:
а – без наложения ультразвука; б – с наложением ультразвука в процессе наплавки каждого слоя

Результаты металлографического анализа показали, что в верхних слоях наплавки без УЗК четко выражена крупнокристаллическая столбчатая структура (рис. 6, а). В нижних слоях всех стенок наблюдались мелкие разноосные зерна, образование которых обусловлено $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -превращениями, происходящими при многократных термических циклах в процессе наплавки слоев (рис. 6, б).

В случае наплавки с УЗК (режим № 2) в верхних слоях также присутствовала столбчатая структура, однако размер зерна был существенно мельче, чем в образцах без УЗК (рис. 7, а). В нижних слоях образцов с УЗК, как и без УЗК, наблюдались мелкие разноосные зерна (рис. 7, б).

Таким образом, применение УЗК при наплавке (режим № 2) приводит к измельчению зерна в верхних слоях наплавленного металла, хотя столбчатые зерна сохраняются. Формирование мелких разноосных зерен в нижних слоях является общим для всех исследованных режимов наплавки и объясняется $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -превращениями при повторяющихся термических циклах.

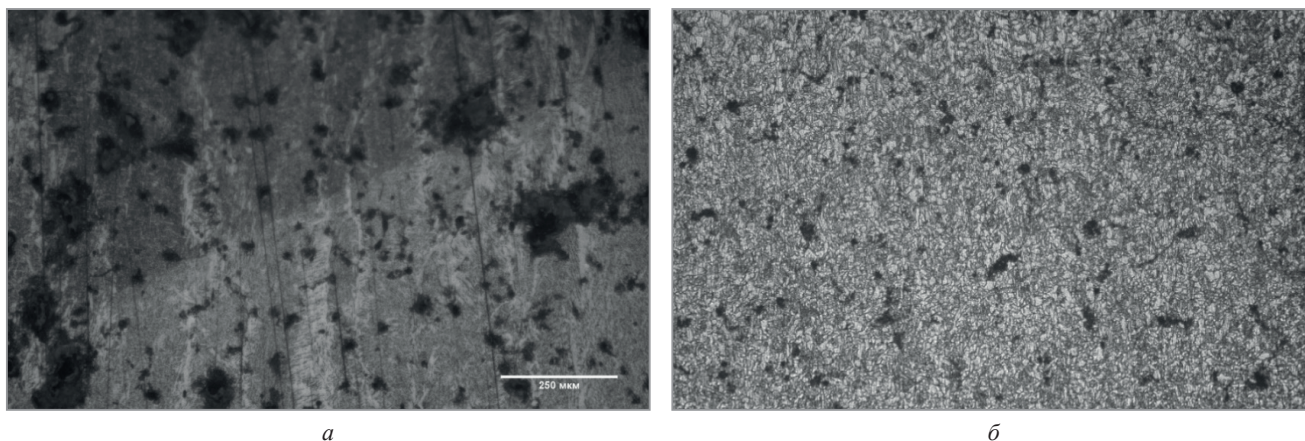


Рис. 6. Микроструктура верхних (а) и нижних (б) слоев образца, полученного без применения ультразвука

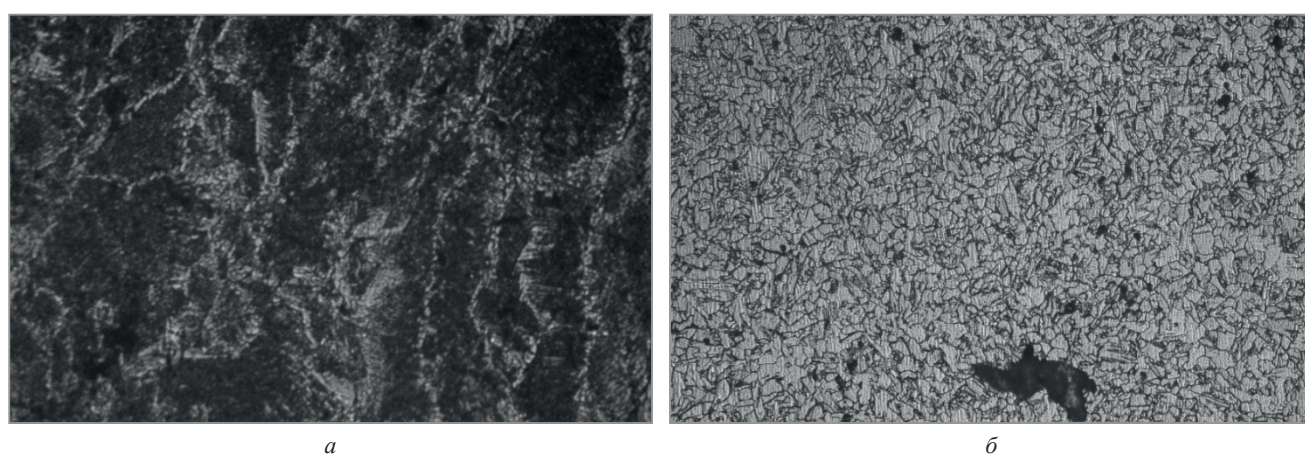
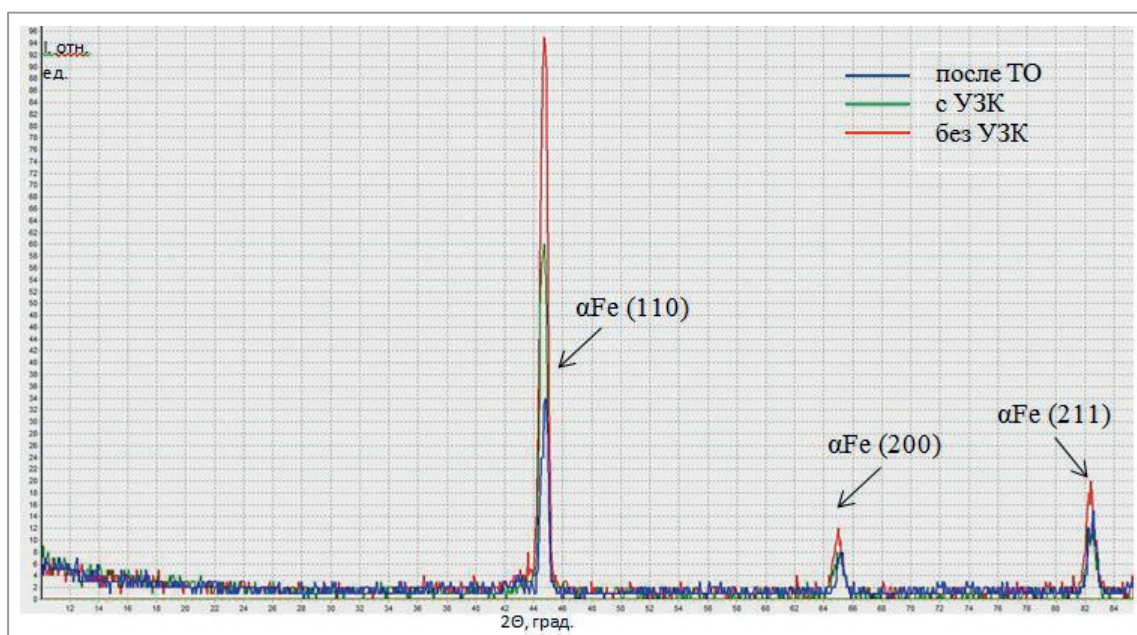


Рис. 7. Микроструктура верхних (а) и нижних (б) слоев образца, полученного при наплавке с УЗК

Рентгеноструктурный анализ (РСА) выявил, что α -Fe-фаза является доминирующей во всех исследованных наплавленных стенках. В верхних слоях образцов фиксируется увеличение интенсивности рефлекса (110) α -Fe по сравнению с отожженным эталонным образцом из стали Ст3 (рис. 8, в), что является следствием формирования выраженной кристаллографической текстуры, характерной для крупных столбчатых зерен с преимущественной ориентацией кристаллических решеток (100) вдоль направления роста.



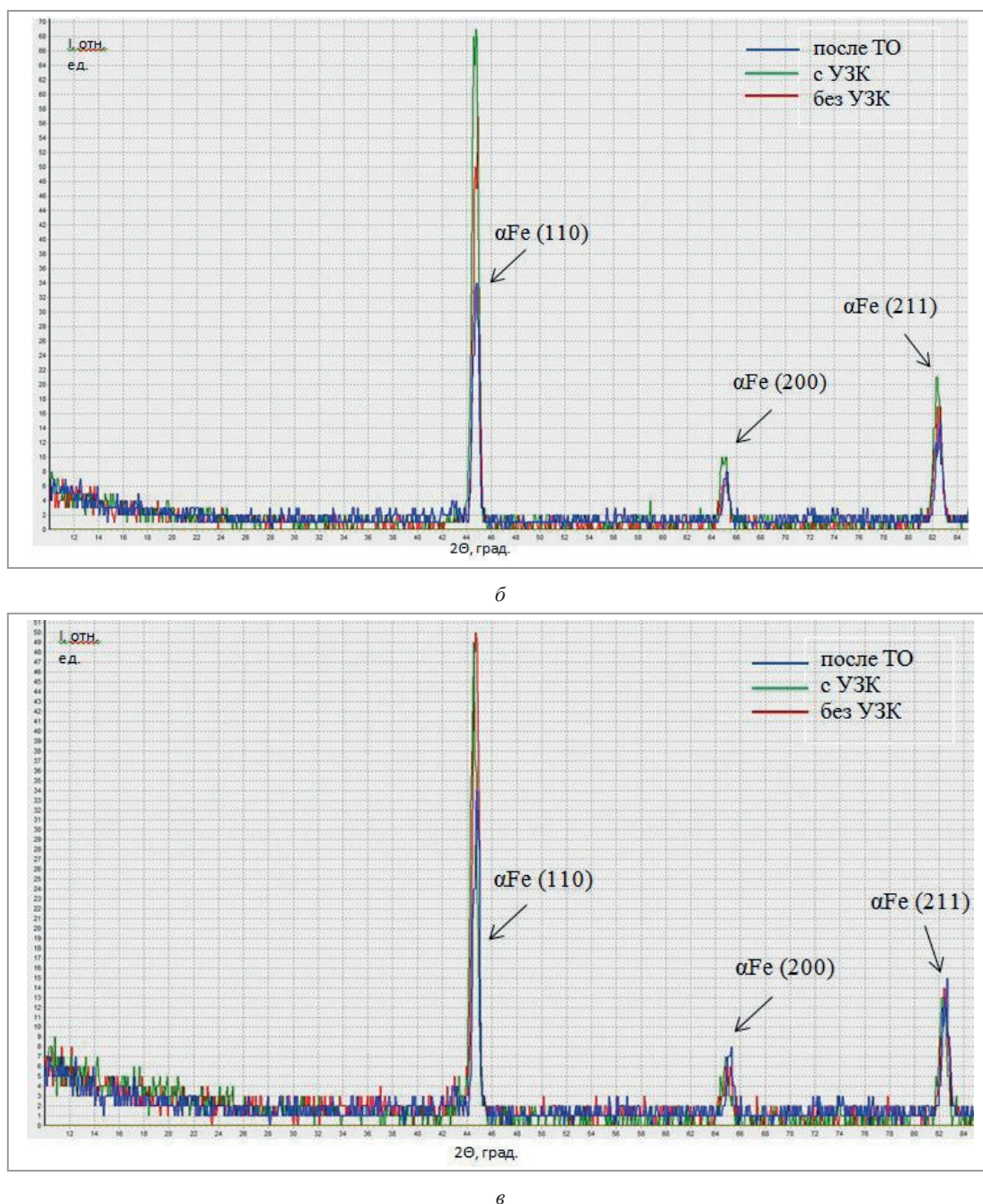


Рис. 8. Дифракционные спектры образцов из нижней (а), средней (б) и верхней (в) частей стенки наплавленных слоев с применением ультразвука и без него, а также образца после термообработки

При наложении ультразвуковых колебаний в процессе наплавки разброс значений интенсивности рефлекса (110) между измерениями значительно уменьшается (рис. 8). Более того, средняя интенсивность этого рефлекса приближается к значениям эталона. Это свидетельствует о формировании более мелкозернистой и изотропной кристаллографической структуры.

Полученные данные РСА полностью коррелируют с результатами оптической микроскопии, где четко визуализируется уменьшение размера столбчатых зерен и повышение доли равноосных зерен в верхних слоях при ультразвуковой обработке.

Указанные эффекты объясняются интенсификацией процессов фрагментации растущих дендритов под действием акустических потоков и кавитационных явлений, генерируемых ультразвуком в расплаве.

Выводы

1. Результаты исследования демонстрируют значимый эффект наложения ультразвуковых колебаний в процессе WAAM-наплавки. Установлено, что УЗК эффективно подавляют рост крупных

столбчатых зерен, что подтверждено как микроструктурным анализом, так и данными РСА. Управление размером зерна достигается за счет комплекса физических явлений, индуцируемых ультразвуком: интенсивного акустического течения, локальной кавитации и вибрационного воздействия на фронт кристаллизации, способствующих фрагментации дендритов.

2. Полученные результаты открывают перспективы для целенаправленного управления микроструктурой и напряженным состоянием деталей, изготавливаемых методом аддитивной наплавки, прямо в процессе их формирования. Ключевое преимущество данного подхода заключается в минимизации или полном исключении необходимости применения энергоемких и дорогостоящих методов последующей термической или механической постобработки, направленных на достижение аналогичных целей.

Работа выполнена в рамках совместного проекта Санкт-Петербургского научного центра (№ 23-РБ-09-43) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ T24СПБГ-008).

ЛИТЕРАТУРА

1. A Low-Cost Open-Source Metal 3-D Printer / G. Anzalone, Ch. Zhang, B. Wijnen [et al.] // IEEE Access. – 2013. – Vol. 1. – P. 803–810.
2. Milewski, J. O. Lasers, electron beams, plasma arcs / J. O. Milewski // Additive Manufacturing of Metals. – 2017. – Vol. 258. – P. 85–97.
3. Feasibility of in situ controlled heat treatment (ISHT) of Inconel 718 during electron beam melting additive manufacturing / W. J. Sames, K. A. Unocic, G. W. Helmeich [et al.] // Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. 13. – P. 156–165.
4. Taminger, K. Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process / K. Taminger, R. A. Hafley // Proceedings of the 3rd Annual automotive composites conference. – Troy, 2003.
5. A comparison of energy consumption in wire-based and powder-based additive-subtractive manufacturing / M. A. Jackson, A. Van Asten, J. D. Morrow [et al.] // Procedia Manufacturing. – 2016. – Vol. 5. – P. 989–1005.
6. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach [et al.] // International Materials Reviews. – 2012. – Vol. 57. – P. 133–164.
7. Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency / J. Guo, Y. Zhou, C. Liu [et al.] // Materials. – 2016. – Vol. 9.
8. Wire arc additive manufacturing / S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison [et al.] // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32. – P. 641–647.
9. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback [et al.] // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.
10. Grain refinement of NiTi alloys during ultrasound-assisted wire-arc directed energy deposition / M. Zhang, B. Wang, X. Li [et al.] // Virtual and Physical Prototyping. – 2023. – Vol. 19.
11. Structure, martensitic transformations and mechanical behaviour of NiTi shape memory alloy produced by wire arc additive manufacturing / N. Resnina, I. A. Palani, S. Belyaev [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – Vol. 851.
12. Modelling of wire-arc additive manufacturing – A review / R. F. V. Sampaio, J. P. M. Pragaña, I. M. F. Bragança [et al.] // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. – 2023. – Vol. 6. – P. 100121.
13. Grain refinement of NiTi alloys during ultrasound-assisted wire-arc directed energy deposition / M. Zhang, B. Wang, X. Li [et al.] // Virtual and Physical Prototyping. – 2023. – Vol. 19.
14. 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 [et al.] // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 135. – P. 111–118.
15. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V / J. Donoghue, A. A. Antonysamy, F. Martina [et al.] // Materials Characterization. – 2016. – Vol. 114. – P. 103–114.
16. Effects of vertical and pinch rolling on residual stress distributions in wire and arc additively manufactured components / R. Tangestani, G. H. Farrahi, M. Shishegar [et al.] // J. of Mater. Eng. and Perform. – 2020. – Vol. 29. – P. 2073–2084.
17. Yan, F. Grain structure control of additively manufactured metallic materials / F. Yan, W. Xiong, E. J. Faierson // Materials. – 2017. – Vol. 10. – P. 1260.
18. Nickel, A. H. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing / A. H. Nickel, D. M. Barnett, F. B. Prinz // Materials Science and Engineering: A. – 2001. – Vol. 317. – P. 59–64.
19. Effects of in-process ultrasonic vibration on weld formation and grain size of wire and arc additive manufactured parts / J. Zhang, Y. Xing, J. Zhang [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 5168.
20. Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing / Ji Feilong, Qin Xunpeng, Hu Zeqi [et al.] // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 130. – P. 105789.

REFERENCES

1. Anzalone G., Zhang Ch., Wijnen B. [et al.] A Low-Cost Open-Source Metal 3-D Printer. *IEEE Access*, 2013, no. 1, pp. 803–810.
2. Milewski J. O. Lasers, electron beams, plasma arcs. *Additive Manufacturing of Metals*, 2017, vol. 258, pp. 85–97.
3. Sames W. J., Unocic K. A., Helmeich G. W. [et al.] Feasibility of in situ controlled heat treatment (ISHT) of Inconel 718 during electron beam melting additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, vol. 13, pp. 156–165.
4. Taminger K., Hafley R. A. Electron beam freeform fabrication: a rapid metal deposition process. *Proceedings of the 3rd Annual automotive composites conference*. Troy, 2003.

5. Jackson M.A., Van Asten A., Morrow J.D. [et al.] A comparison of energy consumption in wire-based and powder-based additive-subtractive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2016, vol. 5, pp. 989–1005.
6. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K. [et al.] Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, pp. 133–164.
7. Guo J., Zhou Y., Liu C. [et al.] Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency. *Materials*, 2016, vol. 9.
8. Williams S.W., Martina F., Addison A.C. [et al.] Wire arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, pp. 641–647.
9. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. [et al.] Additive manufacturing of metallic components –Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 92, pp. 112–224.
10. Zhang M., Wang B., Li X. [et al.] Grain refinement of NiTi alloys during ultrasound-assisted wire-arc directed energy deposition. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, vol. 19.
11. Resnina N., Palani I.A., Belyaev S. [et al.] Structure, martensitic transformations and mechanical behaviour of NiTi shape memory alloy produced by wire arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 851.
12. Sampaio R.F.V., Pragana J.P.M., Bragança I.M.F. [et al.] Modelling of wire-arc additive manufacturing – A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2023, vol. 6, pp. 100121.
13. Zhang M., Wang B., Li X. [et al.] Grain refinement of NiTi alloys during ultrasound-assisted wire-arc directed energy deposition. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, vol. 19.
14. Colegrove P.A., Donoghue J., Martina F. [et al.] Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 135, pp. 111–118.
15. Donoghue J., Antonysamy A.A., Martina F. [et al.] The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, 2016, vol. 114, pp. 103–114.
16. Tangestani R., Farrahi G.H., Shishegar M. [et al.] Effects of vertical and pinch rolling on residual stress distributions in wire and arc additively manufactured components. *J. of Mater. Eng. and Perform.*, 2020, vol. 29, pp. 2073–2084.
17. Yan F., Xiong W., Faierson E.J. Grain structure control of additively manufactured metallic materials. *Materials*, 2017, vol. 10, pp. 1260.
18. Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, vol. 317, pp. 59–64.
19. Zhang J., Xing Y., Zhang J. [et al.] Effects of in-process ultrasonic vibration on weld formation and grain size of wire and arc additive manufactured parts. *Materials*, 2022, vol. 15, p. 5168.
20. Ji Feilong, Qin Xunpeng, Hu Zeqi [et al.] Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 130, pp. 105789.