

Научная статья

УДК 534-8, 621.792.3

doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-34-40

## Обзор методов применения ультразвука в аддитивном производстве

Вячеслав Михайлович Приходько<sup>1</sup>, д.т.н.

Дмитрий Сергеевич Фатюхин<sup>2</sup>, д.т.н.

Равиль Исламович Нигметзянов<sup>3</sup>, к.т.н.

Александр Вадимович Сухов<sup>4</sup>, к.т.н.

Владимир Константинович Кольдюшов<sup>5</sup>, аспирант

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>1</sup> prihodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8261-0424>

<sup>2</sup> mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-341>

<sup>3</sup> lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1443-7584>

<sup>4</sup> sukhov-aleksandr96@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-9097-8216>

<sup>5</sup> v.koldyushov@list.ru, <http://orcid.org/0009-0005-6711-6256>

**Аннотация.** Проанализирован ряд работ, посвященных применению ультразвука в аддитивном производстве. Рассмотрено использование ультразвука как на этапах пост-обработки, так и непосредственно в процессе создания изделий. Выявлено, что наложение ультразвуковых колебаний на подложку при прямом лазерном выращивании деталей способствует получению мелкозернистой структуры и повышению микротвердости. На этапе постобработки ультразвуковая прокатка в аддитивном производстве позволяет повысить микротвердость, увеличить максимальный предел прочности на разрыв и предел текучести. Повысить эффективность классической технологии ультразвукового аддитивного производства и получить значительное снижение шероховатости поверхности возможно за счёт использования кавитационно-абразивной и кавитационно-эрозионной обработок, а также поверхностного пластического деформирования. На основе анализа источников определены факторы, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность процессов аддитивного производства с применением ультразвуковых колебаний. К ним отнесены такие факторы, как: амплитуда колебаний, температура в зоне обработки, усилие прижима и скорость перемещения инструмента, пара материалов, образующие соединение, и др. Предложены направления исследований по дальнейшему внедрению ультразвука в аддитивное производство, к которым отнесены следующие. Во-первых, комбинации ультразвукового выращивания деталей из порошковых материалов с последующей ультразвуковой прокаткой, а также УАМ с ультразвуковой прокаткой. Во-вторых, исследование влияния таких параметров ультразвуковой обработки, как частоты колебаний и её изменения под нагрузкой, а также формы инструмента на свойства получаемых изделий. Также перспективным направлением является изучение влияния состояния поверхности фольги на механические характеристики получаемых УАМ соединений.

**Ключевые слова:** ультразвуковая аддитивная обработка, ультразвуковая прокатка, аддитивное производство, колебания, ультразвуковая сварка

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-1900463, <https://rscf.ru/project/24-19-00463/>.

**Для цитирования:** Приходько В.М., Фатюхин Д.С., Нигметзянов Р.И., Сухов А.В., Кольдюшов В.К. Обзор методов применения ультразвука в аддитивном производстве // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (176). С. 34–40. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-34-40

## Overview of ultrasound application methods in additive manufacturing

Vyacheslav M. Prikhodko<sup>1</sup>, D.Eng.

Dmitry S. Fatyukhin<sup>2</sup>, D.Eng.

Ravil I. Nigmatzyanov<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.

Alexander V. Sukhov<sup>4</sup>, Ph.D. Eng.

Vladimir K. Koldyushov<sup>5</sup>, PG student

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>1</sup> prikhodko@madi.ru

<sup>2</sup> mitriy2@yandex.ru

<sup>3</sup> lefmo@yandex.ru

<sup>4</sup> sukhov-aleksandr96@mail.ru

<sup>5</sup> v.koldyushov@list.ru

**Abstract.** A number of papers devoted to the use of ultrasound in additive manufacturing are analyzed. The use of ultrasound is viewed both at the stages of post-processing and directly in the process of creating products. It has been revealed that ultrasonic activation in the substrate during direct laser growth of parts contributes to obtaining a fine-grained structure and increasing microhardness. Ultrasonic rolling in additive manufacturing makes it possible to increase microhardness together with maximum tensile and yield strengths. A significant reduction in surface roughness is due to cavitation-abrasive and cavitation-erosion treatments, alongside with surface plastic deformation. Based on the analysis of sources, the factors that have the greatest impact on the efficiency of additive manufacturing operation using ultrasound have been identified. Among these are: the amplitude of the oscillations, the temperature in the operating region, the clamping force and the speed of movement of the tool, etc. Research directions for the further introduction of ultrasound into additive manufacturing are proposed. Among these are combinations of ultrasonic growing of parts using powder materials followed by ultrasonic rolling, as well as UAM in combination with the ultrasonic rolling. Investigation of the influence of ultrasonic treatment parameters such as vibration frequency and its changes under load, as well as the shape of the tool on the properties of the resulting products. The study of the influence of the foil surface condition on the mechanical characteristics of the resulting UAM compounds.

**Keywords:** ultrasonic additive treatment, ultrasonic rolling, additive manufacturing, vibrations, ultrasonic welding

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-1900463, <https://rscf.ru/project/24-19-00463/>.

**For citation:** Prikhodko V.M., Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Sukhov A.V., Koldyushov V.K. Overview of ultrasound application methods in additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 2 (176). P. 34–40. doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-34-40

### Введение

Современные условия производства изделий машиностроения, включая постоянно растущие требования к качеству изделий и экономическим затратам на их производство, стимулируют развитие методов производства, одними из которых являются аддитивные технологии. Их преимуществом являются возможность создания деталей сложных форм и рациональное использование материала, однако им свойственны и недостатки, например, низкое качество поверхности и ограничение по размеру производимых деталей, в том числе при использовании различных металлов.

Одним из методов устранения недостатков является применение ультразвука как на этапе постобработки, так и непосредственно на этапе изготовления детали. Примером

технологии постобработки аддитивных деталей является ультразвуковая прокатка, а одним из наиболее известных аддитивных процессов изготовления является ультразвуковое аддитивное производство (Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)) – технология применения ультразвука, которая базируется на послойном выращивании детали из листов фольги на фрезерных станках с ЧПУ [1]. Данное направление можно считать развивающимся, поскольку его активная проработка идет всего лишь порядка 10 лет [2]. Также существуют технологии, в которых наложение ультразвуковых колебаний в роли вспомогательного воздействия позволяет получить повышенные механические характеристики, примером чего является воздействие ультразвука на подложку при использовании метода прямого лазерного выращивания.

### Применение ультразвука как вспомогательного воздействия

Рациональный подход предложен в [3], где наложение ультразвуковых колебаний на подложку положительно себя показывает при прямом лазерном выращивании деталей из сплава INCONEL 625. Наложение ультразвука происходит по схеме, приведенной на рис. 1 [3].

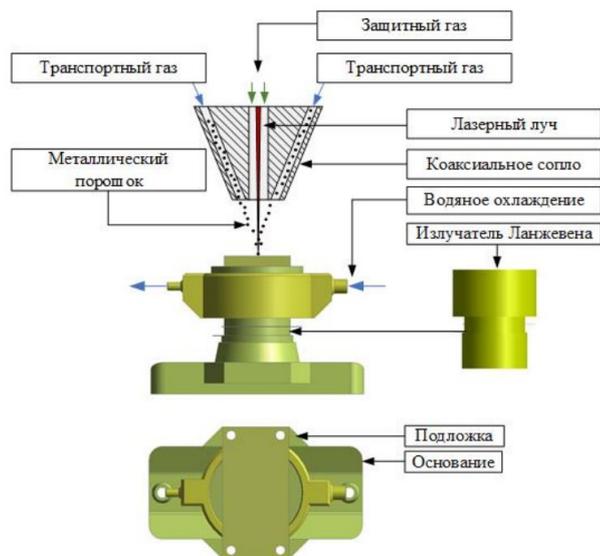


Рис. 1. Схема наложения ультразвука при ультразвуковом выращивании деталей из порошковых материалов

Fig. 1. Ultrasonic activation scheme for ultrasonic growth of parts using powder materials

Авторами показано, что в результате ультразвукового воздействия повышается микротвердость на 5,1 %, а также изменяется микроструктура – в процессе спекания фрагментируются крупные столбчатые дендриты, что способствует получению мелкозернистой структуры. Однако в работе малое внимание уделено ультразвуковым параметрам – таким, как амплитуда колебаний и распределение пучности колебаний, из чего не ясна степень воздействия ультразвука непосредственно на образец. Кроме того, авторами в качестве подложки была выбрана пластина габаритами 2×50×100 мм, неподвижность которой обеспечивалась за счет болтовых соединений. Однако известно, что при наложении ультразвука на сопряженные соединения снижается сила трения, в связи с чем не ясно, насколько повлиял

этот эффект на результаты, полученные в работе.

Примером технологии постобработки, где ультразвук является вспомогательным фактором и воздействует непосредственно на деталь, служит аддитивное производство с использованием ультразвуковой прокатки (Ultrasonic rolling – enhanced additive manufacturing) [4]. В этом случае ультразвук накладывается сразу после наплавки по схеме, приведенной на рис. 2.

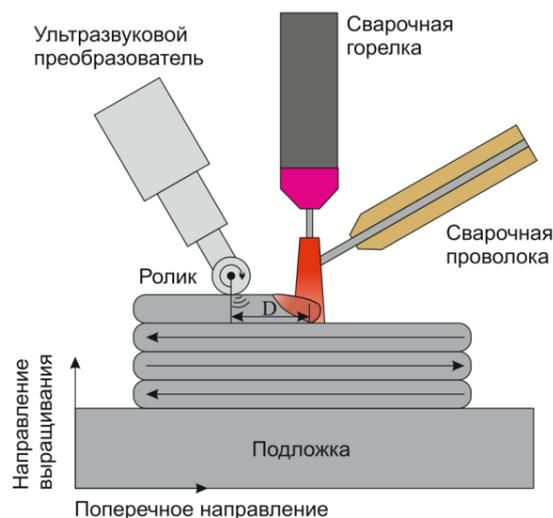


Рис. 2. Схема наложения ультразвука при прокатке

Fig. 2. Ultrasonic activation scheme for rolling

В работе [4] описано применение способа при производстве деталей из проволоки Inconel 718. Результаты показали, что микротвердость увеличивается на 42,5 %, а также улучшаются максимальный предел прочности на разрыв на 38,9% и предела текучести на 84,7 %. В качестве механизмов, обуславливающих эти результаты, авторы приводят твердо-растворное и дислокационное упрочнение. Дополнительно отмечается, что в результате наложения ультразвука и последующей термообработки морфология зерен является равноосной.

Однако авторами недостаточно ясно описаны параметры ультразвуковой обработки – так, указано, что за счет варьирования угла наклона колебательной системы можно контролировать расстояние между роликом и ванной, но не рассмотрены углы наклона и не описан выбор вышеуказанного расстояния, что может непосредственно влиять на морфологию получаемых зерен.

Еще одним направлением применения ультразвука на этапе постобработки является снижение шероховатости поверхности получаемой детали [5]. Так, при использовании кавитационно-абразивной кавитационно-эрозионной обработки за счет использования эффекта кавитации при жидкостной обработке достигается снижение шероховатости поверхности до 43 % от исходных значений, а также достигается либо частичное устранение дефектов поверхности (в первом случае), либо полное устранение (во втором случае). Также рассматривается влияние ультразвуковой обработки на шероховатость поверхности металлических деталей методом ППД [6] и обработки в аэрозоле растворителя деталей из ABS-пластика [6], что позволяет снизить шероховатость и повысить качество поверхности.

### Ультразвуковое аддитивное производство

Наиболее известный метод применения ультразвука в аддитивном производстве, UAM, представляет собой процесс сварки заготовок из фольги. Классический процесс (рис. 3) проходит следующим образом: на подложку из фольгированного материала накладывается фольга, которая прижимается излучателем ультразвуковой колебательной системы с нормальной силой, после чего на фольгу накладывается ультразвук и начинается перемещение излучателя относительно фольги. За счет нормальной силы и возникающих быстрых перемещений излучателя разрушаются неровности на границе свариваемых материалов и рассеиваются оксиды, что позволяет создать плотный контакт материал – материал.

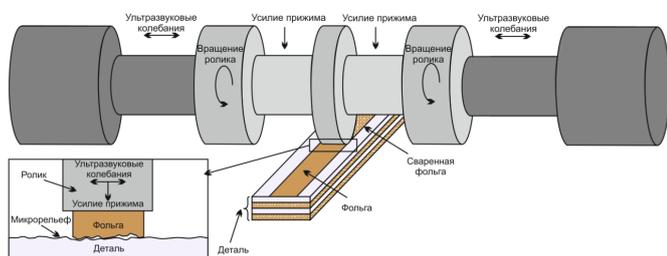


Рис. 3. Схема процесса ультразвукового аддитивного производства

Fig. 3. Ultrasonic additive manufacturing operation scheme

Вышеописанный процесс обладает некоторыми особенностями. Во-первых,

температура в зоне сварки, как правило, не превышает 30...50 % от температуры плавления используемой фольги, в связи с чем возможно соединение различных материалов, в том числе получение связки углепластик – металл [7]. Также становится возможным внедрение датчиков различного типа в поверхности, что невозможно при соединениях с высокими температурами. Во-вторых, поскольку процесс проходит на фрезерных станках с ЧПУ – повышаются производственные возможности за счет повышения вариативности технологических операций. В результате становится возможным изготовление деталей с закрытыми полостями путем чередования операций «сварка слоев – фрезерование».

В [7] рассматривается процесс разрушения соединений «углепластик-металл», полученных методом UAM. Авторы приходят к выводу, что можно добиться требуемого процесса разрушения – или углепластика, или металла. Проектирование процесса разрушения заключается в изменении количества слоев углепластика, вследствие чего можно получать или более высокое энергопоглощение, или повышение удельной прочности и жесткости. В [8] рассматривается сравнение композиции «армированное углеродное волокно – алюминий», полученных с помощью заклепок и методом UAM. Результаты показывают повышение эффективности поглощения энергии, требуемого усилия на смятие и пикового крутящего момента при кручении, а также повышение стабильности характеристик при осевом сжатии.

Применение UAM позволяет эффективно встраивать датчики в тело заготовки, что показано в [7]. Однако авторами признается необходимость уточнения полученных ими регрессионных моделей в части рассматриваемых параметров обработки – технологических параметров, настроек ультразвукового оборудования и применяемых материалов, из которых особое внимание уделяется амплитуде колебаний, температуре, силе прижима и скорости.

В [9] рассмотрено соединение алмаза и меди посредством UAM, что рассматривается как перспективное решение по теплоотводу в электронных системах. В сравнении с медным образцом композиция «алмаз – медь» показывает повышенную на 12 % теплопроводность, что объясняется комплексным отражением особенностей границы раздела фаз, типа кристалла и микроструктуры. Но, несмотря на

большое сходство, в [9] рассматриваемых материалов, толщин фольг, параметров предварительной обработки и прочем, указанные в работах амплитуды колебаний различаются на 5 мкм, что по оценкам исследователей весьма значимо [10], а скорость сварки в 2 раза – 10 и 20 мм/с соответственно, что говорит об отсутствии рациональных критериев выбора параметров ультразвуковой обработки.

При этом во многих работах делается упор на создание «металл – волокно», в то время как еще одним перспективным направлением является применение метода для создания соединений «металл – металл».

Например, в [11] описывается использование метода УАМ для проведения шовной сварки листов алюминия 6061 толщиной 1,93 мм. Дальнейшие испытания показывают, что механические характеристики полученных образцов схожи с характеристиками цельных пластин из такого же материала. При этом меньшие углы наклона и большие амплитуды обеспечивают самые высокие значения прочности в пределах рассматриваемых значений.

В [12] сравнивается два вида применения УАМ для создания композиции медь – алюминий – с предварительным нагревом листов фольги, и с электроимпульсной обработкой. В результате при электроимпульсной обработке повышается предел прочности на растяжение и относительное удлинение на 26 и 72 % соответственно, что авторы объясняют усилением обратного напряжения вследствие образования зон Гинье-Престона и особенностями совместной деформации «медь – алюминий».

Однако в большей части работ авторы, в рамках своих направлений исследований, придерживаются определенных «стандартных» значений параметров обработки, особенно ультразвуковых, хотя очевидно, что в различных условиях будут отличаться и особенности обработки.

### **Влияние параметров обработки на механические свойства**

Большая часть работ, посвященных исследованию параметров обработки при УАМ, а также при ультразвуковой сварке (схожем процессе), затрагивает три параметра – усилие прижима, скорость сварки и амплитуду колебаний [10, 13 – 15].

В работе [10] рассматривается влияние на прочность композиции «титан – алюминий» основных параметров обработки: силы прижима, скорости сварки и амплитуды колебаний. В результате определено, что наиболее высокая механическая прочность соединения достигается при силе 1500 Н, скорости сварки 42 мм/с и амплитуде колебаний 30 мкм. Также рассматривается влияние амплитуды колебаний на процесс УАМ при создании композиции Титан/Алюминий. Представленные результаты демонстрируют зависимость механических свойств, таких как предел прочности на растяжение, предел текучести и предел прочности на изгиб от изменения амплитуды колебаний даже в узком диапазоне 28...32 мкм. Кроме того, отмечаются преобразования кристаллической решетки в области границы раздела.

Однако в вышеуказанных работах кроме амплитуды не рассматривается иных факторов, влияющих на эффективность ультразвукового воздействия, например, частоты колебаний или формы ультразвукового излучателя. Так, в [15] отмечается, что амплитуда колебаний оказывает наибольшее влияние на коэффициент трения, который в свою очередь влияет на температуру на границе раздела фаз. Но также на трение оказывает влияние и площадь контакта, которая напрямую зависит от формы инструмента. В свою очередь, площадь контакта будет влиять и на температуру в зоне контакта, что является важной особенностью процесса УАМ, когда процесс идет при сравнительно низких температурах, не позволяя проходить изменениям микроструктуры соединяемых материалов.

В [15] систематизированы параметры, влияющие на процесс ультразвуковой сварки: время сварки, амплитуда колебаний, усилие прижима, а также форма инструмента, как особо значимый параметр. Геометрия инструмента играет ключевую роль в пластической деформации и в течение материала. Вместе с тем нельзя допустить прокалывания или иных повреждений заготовок. В сравнении с ультразвуковой сваркой при УАМ форма инструмента может играть более важную роль с учетом малой толщины соединяемых листов фольги. В [14] отмечается влияние усилия прижима – показано, что для повышения качества соединений, полученных ультразвуковой сваркой, и уменьшения разброса их прочностных показателей необходим контроль взаимного

расположения выступов сварочного наконечника и наковальни, а также глубины их проплавления.

Стоит отметить, что в малом числе работ уделяется внимание качеству поверхности фольги перед соединением. В [13] этот фактор особо выделяется в рекомендациях к дальнейшим исследованиям и отмечается как недостаточно рассматриваемый. В [14] рассмотрено состояние поверхности деталей как фактор, влияющий на качество соединений, полученных ультразвуковой сваркой. Показано, что предварительная тонкая шлифовка обеспечивает формирование соединений с наибольшей прочностью, а использование уже грубой шлифовки снижает прочность соединения на 20 % при уменьшении энергии разрушения в 5 раз в сравнении с тонкой шлифовкой.

### Перспективы применения ультразвука в аддитивном производстве

Анализируя улучшение характеристик соединений, полученных ультразвуковой сваркой, были выявлены следующие перспективные направления исследований:

1. Комбинация процессов. Перспективными выглядят комбинации ультразвукового выращивания деталей из порошковых материалов с последующей ультразвуковой прокаткой, а также УАМ с ультразвуковой прокаткой.

2. Детальное исследование влияния ультразвуковых параметров обработки на свойства получаемых изделий. В частности, частоты колебаний и её изменению под нагрузкой, а также формы инструмента.

3. Изучение влияния состояния поверхности фольги на изделиях. Поскольку под действием одновременно приложенного давления и ультразвуковых вибраций происходит разрушение оксидных плёнок на поверхности металлов и образование прямого металлического контакта на атомарном уровне, вероятно, исходная шероховатость используемой фольги также будет оказывать влияние на итоговые механические характеристики получаемых соединений.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Blyweert P., Nicolas V., Fierro V., Celzard A. 3D-printing of carbon-based materials: A review, Carbon. V. 183. 2021, P. 449–485, ISSN 0008-6223, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.07.036>.

2. Назаров А.А. Ультразвуковая аддитивная технология: обзор зарубежных исследований и разработок // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: Материалы Международной научной конференции, Витебск, 26–29 сентября 2016 года. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2016. С. 60–62. EDNBVMNPK.

3. Шварц И.В. Исследование микроструктуры и твердости сплава Inconel 625, полученного методом прямого лазерного выращивания с ультразвуковым воздействием / И. В. Шварц, А. Х. Гильмутдинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2025. Т. 27. № 1. С. 37–45. DOI 10.15593/2224-9877/2025.1.04. EDN DYSOPM.

4. Li H., Li Z., Fu M., Yi H., Zhang H., Li R. Ultrasonic rolling-enhanced additive manufacturing of IN718 superalloy: Microstructural refinement and mechanical property improvement through variable power modulation. Additive Manufacturing. V.109. 2025. 104891. ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104891>.

5. Сундуков С.К., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М. Сравнение методов ультразвуковой обработки поверхностей, полученных послойным синтезом, на примере сплава Ti6Al4V // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2025. Т. 27. № 2. С. 6–28. DOI 10.17212/1994-6309-2025-27.2-6-28. EDN JTKHOT.

6. Приходько В.М., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С., Нигметзянов Р.И. Применение ультразвука для модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 3–12. DOI 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12. EDN OEOFQG.

7. HongqiGuo M., Bryant G., Leon M. Joining of carbon fiber and aluminum using ultrasonic additive manufacturing (UAM), Composite Structures. V. 208. 2019. P. 180–188, ISSN 0263-8223. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.004>.

8. HongqiGuo, M. Bryant G., Leon M. Experimental investigation of CFRP-AA structures joined by ultrasonic additive manufacturing (UAM) and resistance spot welding (RSW). Composites Part B: Engineering. V. 260. 2023. 110768. ISSN 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110768>.

9. Wang B., Yang F., Zhang H., He P. Microstructure and interface evolution of diamond/Cu composites prepared via ultrasonic additive manufacturing (UAM). Journal of Materials Research and Technology. V. 25. 2023. P. 546–551. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.191>.

10. Zhou Ya., Wang Z., Zhao J., Jiang F. Effect of ultrasonic amplitude on interfacial characteristics and mechanical properties laminated metal composites fabricated by ultrasonic additive manufacturing/ Additive Manufacturing. V. 74. 2023. ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103725>.

11. Wolcott P.J., Pawlowski C., Headings L.M., Dapino M.J. Seam Welding of Aluminum Sheet Using Ultrasonic Additive Manufacturing System. January 2017. № 139. (1) <https://doi.org/10.1115/1.4034007>

12. Zhou Ya., Wang Z., Zhao J., Jiang F. Microstructure characteristics and mechanical properties of Cu/Al laminated metal composites fabricated by electropulsing assisted ultrasonic additive manufacturing. Journal of Materials

Processing Technology. V. 313. 2023. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117884>.

13. Yang J., Xie C., Zhang J., Qiao J. Design strategies for enhancing strength and toughness in ultrasonic welding of dissimilar metals: A review materials Today Communications. V. 42. 2025. ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111502>.

14. Mukhametgalina A. Effect of surface state on the quality of copper joints produced by ultrasonic welding. Letters on Materials. 14. 190-197. 10.48612/letters/2024-3-190-197.

15. Yi D., Zhang S., Zhang H., Zheng L., Norfolk M. Power consumption and friction coefficient in the ultrasonic consolidation of aluminium alloys. Materials Science and Technology. 2017; doi:10.1080/02670836.2016.1254912

## REFERENCES

1. Blyweert P., Nicolas V., Fierro V., Celzard A. 3D-printing of carbon-based materials: A review, Carbon. V. 183. 2021, P. 449-485, ISSN 0008-6223, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.07.036>.

2. Nazarov A.A. Ultrasonic additive technology: a review of foreign research and developments // Technical acoustics: developments, problems, prospects: Proceedings of the International Scientific Conference, Vitebsk, September 26-29, 2016. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2016. pp. 60-62. EDNBYMNPk.

3. Schwartz I.V. Investigation of the microstructure and hardness of Inconel 625 alloy obtained by direct laser growth using ultrasonic exposure // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. 2025, vol. 27, no. 1. pp. 37-45. DOI 10.15593/2224-9877/2025.1.04. EDN DYSOPM.

4. Li H., Li Z., Fu M., Yi H., Zhang H., Li R. Ultrasonic rolling-enhanced additive manufacturing of IN718 superalloy: Microstructural refinement and mechanical property improvement through variable power modulation. Additive Manufacturing. V.109. 2025. 104891. ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104891>

5. Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M. Comparison of ultrasonic surface treatment methods applied to additively manufactured Ti-6Al-4V alloy// Metalworking (technology, equipment, tools). 2025, vol. 27, no. 2. pp. 6-28. DOI 10.17212/1994-6309-2025-27.2-6-28. EDN JTKHOT.

6. Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I. Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced by additive technologies. //

Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025, no. 7 (169), pp. 3-12. DOI 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12. EDN OEOFQG.

7. HongqiGuo M., Bryant G., Leon M. Joining of carbon fiber and aluminum using ultrasonic additive manufacturing (UAM), Composite Structures. V. 208. 2019. P. 180-188, ISSN 0263-8223. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.004>.

8. HongqiGuo, M. Bryant G., Leon M. Experimental investigation of CFRP-AA structures joined by ultrasonic additive manufacturing (UAM) and resistance spot welding (RSW). Composites Part B: Engineering. V. 260. 2023. 110768. ISSN 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110768>.

9. Wang B., Yang F., Zhang H., He P. Microstructure and interface evolution of diamond/Cu composites prepared via ultrasonic additive manufacturing (UAM). Journal of Materials Research and Technology. V. 25. 2023. P. 546-551. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.191>.

10. Zhou Ya., Wang Z., Zhao J., Jiang F. Effect of ultrasonic amplitude on interfacial characteristics and mechanical properties of Ti/Al laminated metal composites fabricated by ultrasonic additive manufacturing/ Additive Manufacturing. V. 74. 2023. ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103725>.

11. Wolcott P.J., Pawlowski C., Headings L.M., Dapino M.J. Seam Welding of Aluminum Sheet Using Ultrasonic Additive Manufacturing System. January 2017. № 139. (1) <https://doi.org/10.1115/1.4034007>

12. Zhou Ya., Wang Z., Zhao J., Jiang F. Microstructure characteristics and mechanical properties of Cu/Al laminated metal composites fabricated by electropulsing assisted ultrasonic additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology. V. 313. 2023. ISSN 0924-0136, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117884>.

13. Yang J., Xie C., Zhang J., Qiao J. Design strategies for enhancing strength and toughness in ultrasonic welding of dissimilar metals: A review materials Today Communications. V. 42. 2025. ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111502>.

14. Mukhametgalina A. Effect of surface state on the quality of copper joints produced by ultrasonic welding. Letters on Materials. 14. 10.48612/letters/2024-3-190-197.

15. Yi D., Zhang S., Zhang H., Zheng L., Norfolk M. Power consumption and friction coefficient in the ultrasonic consolidation of aluminium alloys. Materials Science and Technology. 2017. doi:10.1080/02670836.2016.1254912

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 30.11.2025; принята к публикации 14.12.2025.

The article was submitted 31.10.2025; approved after reviewing 30.11.2025; assepted for publication 14.12.2025.