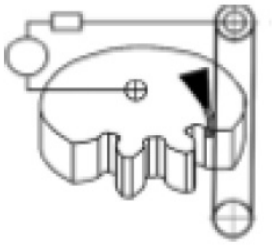
Технологии электро-физико-химической и комбинированной обработки



Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 3-12.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 3-12.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12

Применение ультразвука для модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями

Вячеслав Михайлович Приходько[1], член.-корр. РАН, д.т.н.
Равиль Исламович Нигметзянов[2], к.т.н.
Сергей Константинович Сундуков[3], к.т.н.
Дмитрий Сергеевич Фатюхин[4], д.т.н.
[1, 2, 3, 4] *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*
[1] prikhodko@madi.ru, https://orcid.org/0000-0001-8261-0424
[2] lefmo@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0008-1443-7584
[3] sergey-lefmo@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4393-4471
[4] mitriy2@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5914-3415

Аннотация. *Проанализирован ряд работ, посвященных технологической наследственности изделий, полученных аддитивными технологиями. Одними из основных недостатков методов аддитивного изготовления пластиковых и металлических объектов является высокая шероховатость поверхности, обусловленная послойным нанесением материала. На основе анализа источников определены направления развития ультразвуковой пост-обработки изделий, позволяющие значительно уменьшить шероховатость поверхности. Проведены исследования по финишной обработке пластиковых изделий в тумане растворителя, полученного методом ультразвукового распыления. Метод позволяет регулировать размер капель и скорость их движения, за счёт изменения режимов ультразвукового воздействия. Предложены схемы обработки туманом изделий разных типоразмеров. В результате экспериментальных исследований установлено, что обработка в тумане растворителя, полученного методом ультразвукового распыления, позволяет многократно уменьшить шероховатость поверхности. Для деталей, полученных методом селективного лазерного плавления, предложены различные виды ультразвуковой обработки, позволяющие повысить качество поверхности изделий. Проведены сравнительные исследования воздействия кавитационно-эрозионной и кавитационно-абразивной обработки, а также ультразвукового поверхностного пластического деформирования на снижение шероховатости поверхности. Выявлено, что при всех рассмотренных видах ультразвуковой обработки происходит снижение шероховатости поверхности: при кавитационно-эрозионной на 33 %, при кавитационно-абразивной на 43 %, при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании на 52 %.*

Ключевые слова: ультразвук, колебания, 3D-печать, шероховатость, аэрозоль

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Создание научно-технических основ применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве» № 24-19-00463

© Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С., 2025

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

Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced by additive technologies

Vyacheslav M. Prikhodko [1], Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D. Eng.
Ravil I. Nigmetzyanov[2], Ph.D Eng.
Sergey K. Sundukov[3], Ph.D Eng.
Dmitry S. Fatyukhin[4], D. Eng.
[1, 2, 3, 4] *Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russia*
[1] prikhodko@madi.ru
[2] lefmo@yandex.ru
[3] sergey-lefmo@yandex.ru
[4] mitriy2@yandex.ru

Abstract. *A number of works devoted to the technological heredity of products obtained by additive technologies are analyzed. One of the main disadvantages of additive manufacturing methods for plastic and metal objects is the high surface roughness caused by the layering technique. Based on the analysis of the sources, the directions of development of ultrasonic post-treatment of products have been determined. It can significantly reduce surface roughness. Studies have been conducted on the finishing of plastic products in a solvent evaporation obtained by ultrasonic spraying. The technique makes it possible to adjust the size of the droplets and the speed of their movement by changing the modes of ultrasonic treatment. Evaporating treatment schemes for products of different sizes are proposed. As a result of experimental studies, it has been established that evaporating treatment of a solvent obtained by ultrasonic spraying allows significant reduction of the surface roughness. Various types of ultrasonic treatment have been proposed for parts obtained by selective laser melting to improve the surface quality of products. Comparative studies have been conducted on the effects of cavitation-erosion and cavitation-abrasive treatment, as well as ultrasonic surface plastic deformation aimed at reducing surface roughness. It was revealed that all mentioned types of ultrasonic treatment contribute to surface roughness decrease in the following ways: cavitation-erosion by 33 %, cavitation-abrasive by 43 %, ultrasonic surface plastic deformation by 52 %.*

Keywords: ultrasound, vibrations, 3D printing, roughness, aerosol

Acknowledgments: The work was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation in the priority area of activity of the Russian Science Foundation “Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups” of the scientific project: “Creation of scientific and technical foundations for the use of ultrasonic technologies in additive manufacturing” No. 24-19-00463

For citation: Prikhodko V.M., Nigmetzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Ultrasonic application for surface layer modifying in parts produced by additive technologies / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-3-12

Введение

Наряду с очевидными преимуществами, получение изделий аддитивными технологиями имеют и ряд значительных недостатков, среди которых наиболее значимыми являются пористость, структурная неоднородность, анизотропия свойств материалов, зависящая от ориентации слоёв [1], вследствие чего происходит значительное изменение характеристик прочности и пластичности. Наиболее важным вопросом является обеспечение требуемой микрогеометрии функциональных поверхностей аддитивных изделий.

Поскольку качество поверхностного слоя во многом определяет эксплуатационные свойства изделия в целом, то именно высокая шероховатость является основным фактором, препятствующим более широкому применению аддитивных технологий [2].

Пластиковые и металлические изделия, полученные аддитивными технологиями, имеют свои особенности.

Наиболее распространённым способом снижения шероховатости объектов, изготовленных из ABS или PLA, является выдержка изделия в парах растворителя. При контакте поверхности с мелкодисперсными каплями растворителя происходит частичное растворение пластика на поверхности изделия. Поскольку ультразвуковое воздействие на жидкость используется, в том числе, и для создания аэрозолей различной дисперсности, создание тумана растворителя ультразвуком позволяет эффективно производить пост-обработку пластиковых объектов.

Распыление жидкости под воздействием ультразвука основано на таких акустико-технологических эффектах, как кавитация, коагуляция и др. Изменением амплитуды и частоты колебаний достигается возможность регулирования дисперсности капель аэрозоля и их концентрации.

Независимо от химического состава сплавляемого металла для селективного лазерного плавления шероховатость поверхности формируется под воздействием следующих факторов [3 – 5]:

− разбрызгивание металла из ванны расплава;

− сфероидизация жидкого металла под действием сил поверхностного натяжения при удалении пучка лазера от зоны расплавления;

− не полностью расплавленные частички порошка, обладающие различной адгезией к поверхности;

− нерасплавленные частицы порошка, прилипшие к поверхности;

− наличие границ между отдельными слоями, вызванные различной степенью расплавления частиц порошка, располагающихся по границам каждого слоя.

Обработка таких изделий являются актуальными и находят отражение во многих научных работах, в которых предлагаются такие способы как лазерное оплавление поверхностей [6], изостатическое прессование, применяемое, в первую очередь, для уплотнения материала [7, 8], различные виды химического воздействия [9, 10], нанесение покрытий [11] и поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [12].

Недостатком указанных способов является то, что они не обеспечивают возможность обработки сложнопрофильных поверхностей. Для этой цели одним из наиболее эффективных методов является ультразвуковая жидкостная обработка [13, 14]. В этом случае рабочими телами являются кавитационные пузырьки, способные проникать в труднодоступные участки поверхности и осуществлять работу по их изменению [15].

В современных исследованиях по данной тематике рассматриваются два вида ультразвуковой жидкостной обработки [16 – 18]: кавитационно-эрозионная (КЭО) и кавитационно-абразивная (КАО). Результатами во всех исследованиях явилось снижение различных параметров шероховатости и изменение морфологии обрабатываемой поверхности, выраженное в уменьшении количества дефектов на поверхности. При этом результаты очень разнятся и достигаются при различных параметрах обработки: время от одной минуты до нескольких часов, а амплитуды ультразвуковых колебаний от 5 до 80 мкм. Лучшие результаты достигаются при КАО при расстоянии между торцом излучателя и обрабатываемой поверхностью 1…2 мм, что является, по сути, размерной обработкой и не может применяться для обработки сложнопрофильных деталей, или при КЭО и КАО совмещённых с электрохимическим полированием на высоких амплитудах колебаний 60…80 мкм, что приводит к значительному нагреву электролита, что, в свою очередь, ускоряет химические реакции и затрудняет оценку вклада ультразвука в получаемый эффект.

Ряд работ посвящён ультразвуковому ППД [19, 20], которое приводит к значительному снижению шероховатости поверхности, её упрочнению и способствует закрытию пор в приповерхностном слое. Недостатком данного способа является сложности и ограничения при обработке сложнопрофильных поверхностей, связанные со сложностью подведения индентора ультразвуковой колебательной системы к труднодоступным местам.

Таким образом, требуется проведение дополнительных исследований для более подробного изучения влияния различных видов

ультразвуковой обработки на свойства поверхностей, полученных аддитивными технологиями, и оптимизация режимов с целью обработки сложнопрофильных изделий.

Исходя из вышесказанного, целью работы является: определение влияния различных видов ультразвуковой обработки на микрогеометрию поверхностей пластиковых и металлических изделий, полученных методами 3D печати.

Обработка пластиковых объектов (на примере ABS–пластика)

Обработка пластиковых изделий проводилась по схемам, представленным на рис. 1.

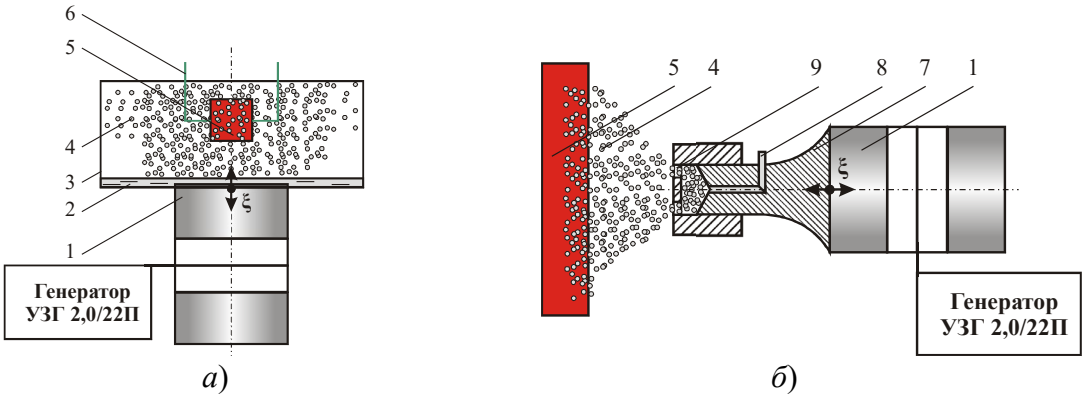


Рис. 1. Схемы ультразвуковой обработки пластиковых изделий парами растворителя:
а – малогабаритных; *б* – крупногабаритных (*1* – пьезокерамический преобразователь; *2* – ацетон; *3* – стеклянный излучатель; *4* – капли аэрозоля; *5* – образец; *6* – подвес; *7* – концентратор; *8* – канал для подачи растворителя; *9* – сопло)

Fig. 1. Schemes of ultrasonic treatment of plastic products with solvent vapors:
a – small-sized; *b* – large (*1* – piezoceramic transducer; *2* – acetone; *3* – glass radiator; *4* – aerosol droplets; *5* – sample; *6* – suspension; *7* – concentrator; *8* – solvent supply channel; *9* – the nozzle)

Схема объёмной обработки изделий показана на рис. 1, *а*. Ультразвуковая колебательная система (полуволновой пьезокерамический преобразователь *1*) встраивается в дно ванны *3*. В ванну подаётся растворитель *2*, который покрывает дно ванны и торец излучателя тонким слоем. При включении генератора УЗГ, электрические колебания подаются на пьезокерамический преобразователь. Под действием колебаний торца излучателя растворитель распыляется в объёме ванны и образует туман. В тумане с помощью подвеса *6* размещается образец *5*.

Приведённая схема обработки наиболее эффективна для изделий сложной формы небольшого размера, поскольку размер зоны устойчивого образования тумана соизмерим с размерами излучающей поверхности.

Для обработки изделий, размеры которых значительно больше размеров излучающей поверхности, используется схема обработки, приведённая на рис. 1, *б*. В этом случае образование тумана происходит с помощью концентратора *7*, соединённого с излучателем *1*. Растворитель подаётся в канал излучателя *8*, через который попадает на торец концентратора. Образовавшийся туман через сопло *9* поступает к обрабатываемой поверхности. Обработка больших поверхностей достигается за счёт взаимного перемещения изделия и колебательной системы.

На 3D-принтере PICASO 3D Designer из ABS-пластика KUMHO ABS 750 на одинаковых режимах печатались два типа образцов (по 2 штуки каждый). Один − в виде кубиков 20×20×20 мм, другой − в виде пластины 100×200×5 мм. По одному образцу каждого типа оставлялись в качестве контрольных. Вторые экземпляры образцов обрабатывались в аэрозоле, полученном методом ультразвукового распыления ацетона. Меньший − по схеме, представленной на рис. 1, *а*, больший − по схеме, представленной на рис. 1, *б*.

Резонансная частота составляла 22,3 кГц, амплитуда колебаний 3…5 мкм. Излучаемая мощность составляла 50 Вт.

Образец 20×20×20 мм с помощью подвеса размещался на расстоянии 30 мм над

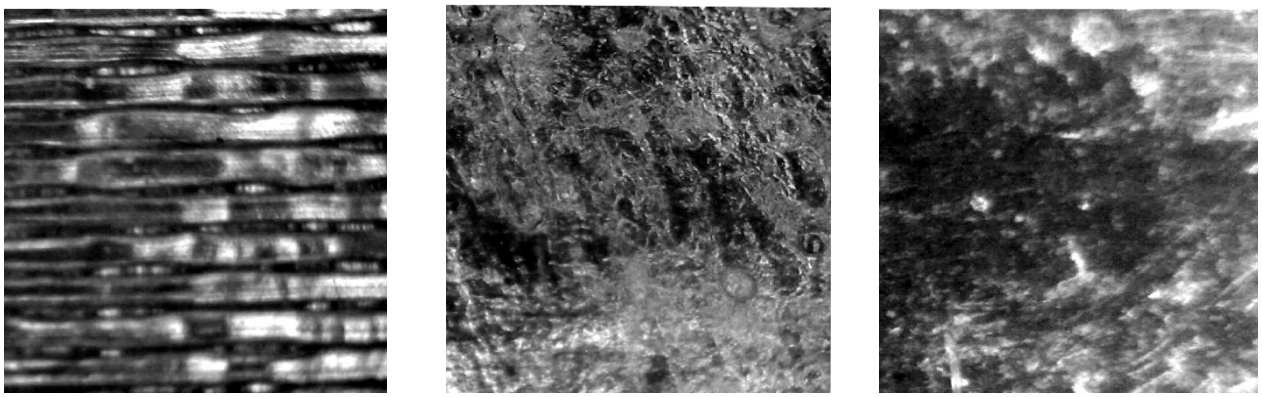
уровнем ацетона. При включении генератора на торце колебательной системы образовывались капли ацетона, образуя туман. Время экспозиции образцов составляло 10 с.

Образец 100×200×5 мм располагался неподвижно на расстоянии 30 мм от распылителя. После включения питания генератора и образования тумана, колебательная система перемещалась вдоль поверхности образца со скоростью 0,5 м/мин.

После обработки поверхности образцов, обращенные к излучателю, исследовались с помощью микроскопа и профилометра.

В результате исследования было выявлено, что схема ультразвукового распыления незначительно влияет на изменение микрогеометрии поверхностей образцов после обработки.

На поверхность образцов после печати хорошо заметны наплавленные слои, образующие шероховатость. После обработки в тумане по схемам рис. 1, пластик на поверхности частично растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины микронеровностей, что приводит к значительному снижению высотных параметров шероховатости. В этом случае на поверхности визуально заметны «наплывы», являющиеся областями взаимодействия поверхности и капель растворителя.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Фотографии поверхности образцов (0,5×0,5 мм):
а – после 3D-печати; *б* – после обработки в аэрозоле по схеме рис. 1, *а*; *в* – после обработки в аэрозоле по схеме рис. 1, *б*

Fig. 2. Photos of the surface of the samples (0,5×0,5 mm):
a – after 3D printing; *b* – after aerosol treatment according to the scheme fig. 1, *a*; *c* – after aerosol treatment according to the scheme fig. 1, *b*

Измерения шероховатости полученных образцов проводились профилометром модели 130. Данные по изменению среднего арифметического отклонения профиля (*Ra*), высоты неровностей профиля по 10 точкам (*Rz*), среднего шага местных выступов (*Sm*) и среднего шага неровностей профиля (*S*) приведены в табл. 1.

1. Изменение шероховатости поверхности образцов при обработке в аэрозоле

1. Changes in the surface roughness of samples during aerosol treatment

Шероховатость поверхности	Способ обработки		
	3D-печать	обработка в аэрозоле по схеме рис. 1, *а*	обработка в аэрозоле по схеме рис. 1, *б*
Ra, мкм	22,7	1,34	1,73
Rz, мкм	85,8	6,9	7,1
Sm, мм	0,414	0,213	0,227
S, мм	0,174	0,007	0,008

По сравнению со значениями шероховатости контрольного образца, у образцов, обработанных в тумане растворителя, произошло значительное снижение высотных и шаговых параметров.

На основании проведённых исследований можно констатировать, что метод обработки пластиковых деталей, изготовленных методом FDM-печати в тумане растворителя, полученного ультразвуковым распылением, эффективен для снижения шероховатости поверхности.

Ультразвуковая обработка поверхностей, полученных послойным синтезом металлических объектов (на примере сплава Ti6Al4V)

Ультразвуковое воздействие на поверхности, полученные послойным синтезом, проводилось кавитационно-эрозионной обработкой (КЭО), кавитационно-абразивной обработкой (КАО) и ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Предварительные эксперименты по проведению жидкостных процессов КЭО и КАО показали, что прочная оксидная плёнка на образцах из Ti6Al4V имеет высокую кавитационную стойкость. Для повышения эффективности ультразвукового воздействия обработка проводилась в травильном растворе, состоящем из плавиковой и азотной кислот, а также дистиллированной воды (3 % HF + 5 % HNO_3 + H_2O).

КЭО и КАО проводились по схеме, представленной на рис. 3, *а*, поверхностное пластическое деформирование по схеме, представленной на рис. 3, *б*.

Процессы КЭО и КАО проводились при погружении в жидкость концентратора ультразвуковой стержневой колебательной системы. Расстояние между торцом концентратора и обрабатываемой поверхностью образца составляло 20 мм.

При КЭО в жидкости, оказавшейся под переменным воздействием сжимающих и растягивающих сил, образуются кавитационные пузырьки, которые осциллируют, схлопываются, объединяются, перемещаются в обрабатываемом объёме под действием акустических потоков, т.е. производят механическую работу. Перечисленные механизмы деформируют поверхность, способствуют удалению непрочно связанных с поверхностью частиц (металлического порошка).

При КАО в жидкость добавлялся абразив, в качестве которого использовался порошок карбида бора B_4C, имеющий высокую твёрдость и устойчивость к химическому воздействию, в объёмной концентрации 20 %. После включения ультразвука под действием потоков абразив распределялся по объёму. В этом случае большая часть энергии, образующаяся при схлопывании, осцилляции и перемещении пузырьков, передаётся абразивным частицам, которые, ударяясь о поверхность, совершают микрорезание, т.е. обработка происходит в результате суммарного действия кавитационных пузырьков и микрорезания.

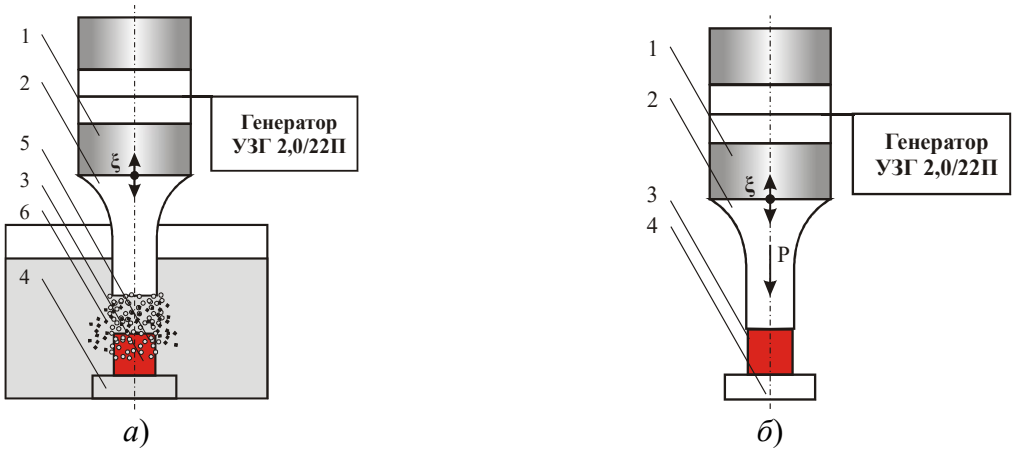
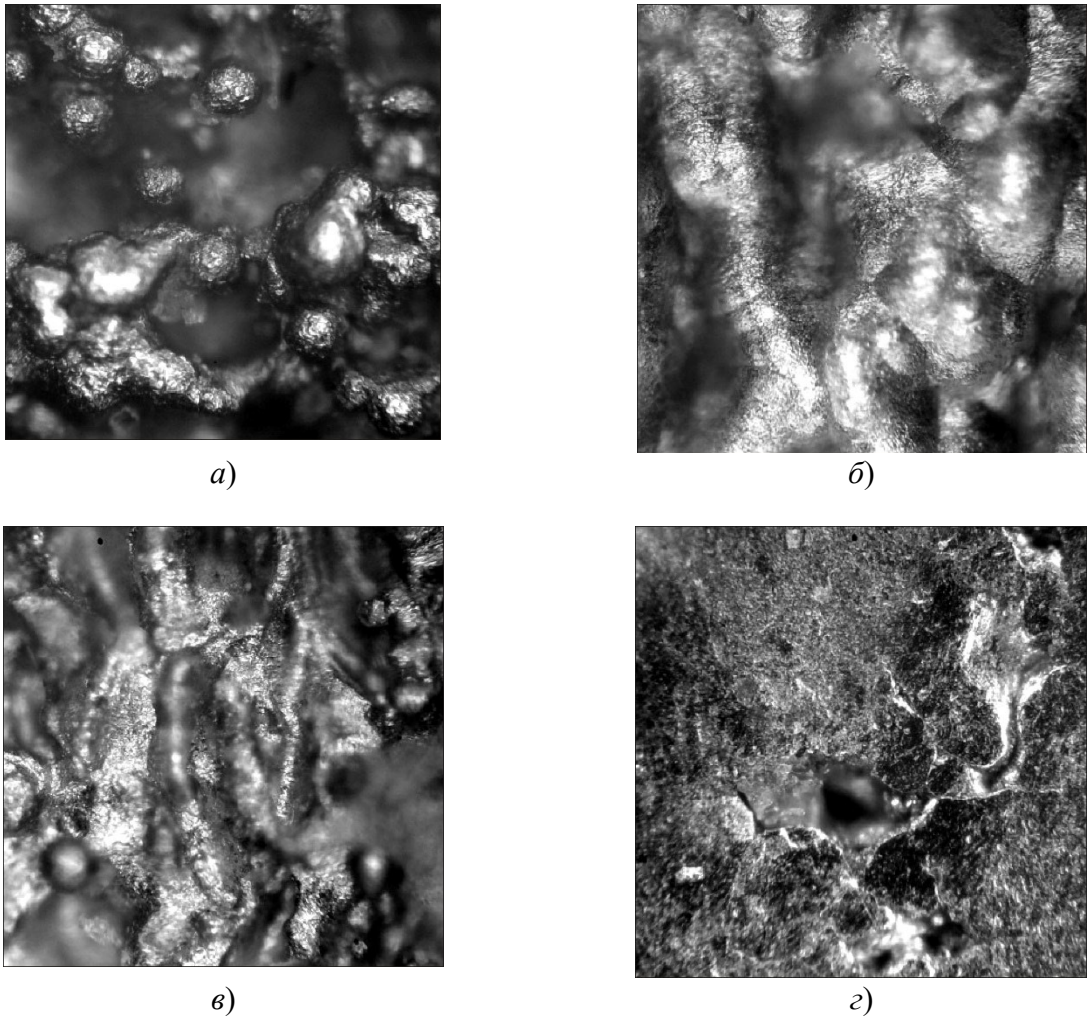


Рис. 3. Схемы ультразвуковой обработки образцов из Ti6Al4V:
а – жидкостной обработки; *б* – поверхностным – пластическим деформированием (*1* – пьезокерамический преобразователь; *2* – концентратор; *3* – образец; *4* – подставка; *5* – кавитационные пузырьки; *6* – абразив)

Fig. 3. Schemes of ultrasonic processing of samples made of Ti6Al4V: *a* – liquid treatment; *b* – suface plastic deformation (*1* – piezoceramic transducer; *2* – concentrator; *3* – sample; *4* – stand; *5* – cavitation bubbles; *6* – abrasive)

При поверхностном пластическом деформировании (рис. 3, *б*) торец концентратора прижимался к обрабатываемой поверхности с силой $P = 70$ Н. Под действием нормально приложенной к поверхности силы происходит деформирование выступов неровностей. Высота сфер уменьшается с образованием плоской площадки, одновременно они растут в ширину и начинают касаться других сфер. В результате на поверхности образуются деформированные области большой площади. Наибольшая площадь достигается при 10 с. обработки. С увеличением времени обработки значительных изменений не происходит, что связано с достижением максимальной степени деформации.

Фотографии поверхности образцов до и после ультразвуковой обработки представлены на рис. 4.



а) *б*)

в) *г*)

Рис. 4. Фотографии поверхности образцов (0,5×0,5 мм):
а − после 3D-печати; *б* − после КЭО; *в* – после КАО; *г* − после ППД

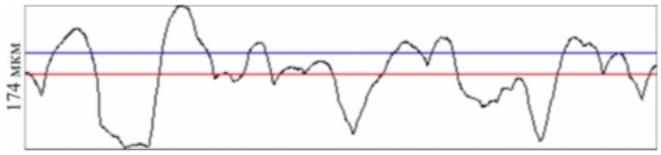
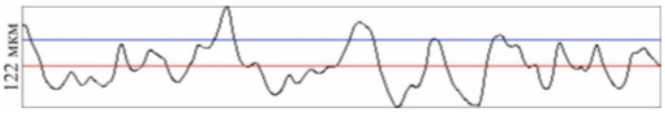
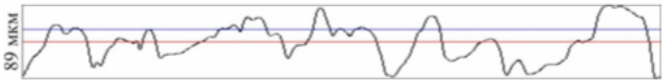
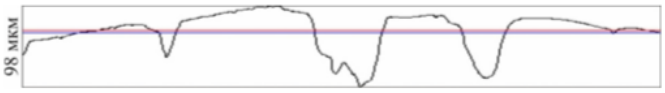
Fig. 4. Photos of the sample surface (0,5×0,5 mm):
a − after 3D printing; *b* – after CEO; *c* − after CAO; *d* – after FPM

Полученные при рассмотренных видах обработки изменения поверхности приводят к изменению её шероховатости. Профиль микронеровностей контрольного образца представляет собой чередование выступов с закруглёнными пиками и впадин с наибольшей высотой неровностей профиля $R_{max} = 174$ мкм.

Рассмотренные ультразвуковые методы обработки приводят к значительным изменениям параметров шероховатости (табл. 2).

2. Изменение шероховатости поверхности образцов при различных видах пост-обработки

2. Changes in surface roughness of samples during various types of post-treatment

Обработка	Участок профиля поверхности (2,5 мм)	Параметры шерохова-тости, мкм
Без обработки		*Ra* = 28,6 *Rz* = 114
КЭО		*Ra* = 19,3 *Rz* = 94,2
КАО		*Ra* = 16,2 *Rz* = 80,5
УЗ ППД		*Ra* = 13,6 *Rz* = 76,3

Так после КЭО профиль поверхности выравнивается и состоит из близких по размеру выступов и впадин, что связано с отсутствием на поверхности дефектов сферической формы. Параметр *Ra* уменьшается до 19,3 мкм.

Профиль после КАО отличается меньшим количеством впадин, и большим количеством деформированных абразивом выступов. При этом *Ra* уменьшается до 16,2 мкм, т.е. снижение составляет 43,5 %. Также профилограмма после данного способа обработки имеет наименьшую высоту 89 мкм.

Рельеф поверхности после ультразвукового ППД за счёт наличия больших ровных площадок имеет наименьшее значение *Ra* = 13,6 мкм, но при этом перепад высотой выступов и глубиной впадин доходит до 98 мкм, что больше, чем при КАО. Это показывает, что совместное кавитационно-абразивное воздействие является более эффективным способом уменьшения выступов поверхности.

Выводы

Проведённые исследования модификации поверхностного слоя деталей, полученных аддитивными технологиями, показали эффективность применения ультразвука для пластиковых и металлических изделий.

В случае изделий из пластика, обработка в тумане растворителя позволяет снизить высотные параметры шероховатости более чем в 10 раз. Поскольку изменение микрогеометрии поверхности достигается за счет попадания капель тумана на обрабатываемую поверхность, управление размерами капель и их количеством позволяет управлять процессом обработки. Регулирование характеристик тумана достигается изменением параметров ультразвукового воздействия.

Использование ультразвука для создания тумана позволяет проводить обработку без нагрева растворителя, что обеспечивает возможность более тонкой обработки пластиков.

Сравнительные исследования различных видов ультразвуковой обработки образцов из титанового сплава Ti6Al4V, полученных методом селективного лазерного плавления, позволили предложить ряд технологических решений.

При жидкостных кавитационно-эрозионной и кавитационно-абразивной видах

обработки в качестве технологической среды рациональным является использование травителя
(3 % HF + 5 % HNO3 + H2O), позволяющего снять кавитационно-стойкую оксидную плёнку.

КЭО в течение 15 мин приводит к удалению сферических дефектов поверхности, которая после обработки представляет собой чередование дорожек расплава. При КАО возникающие давления и температуры в значительной мере воспринимаются абразивными частицами, которые получая ускорение, совершают микрорежущие действия, в результате которых часть дефектов удаляется, а часть деформируется. Обработка методом ультразвукового ППД приводит к смятию дефектов поверхности и образованию на ней больших плоских участков

При всех рассмотренных видах ультразвуковой обработки происходит снижение шероховатости поверхности: *Ra* при КЭО снижается на 33 %, при КАО на 43 %, при ультразвуковом ППД на 52 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Чуканов А.Н.** Определение коэффициента анизотропии и скорости локальной деформации в аддитивных сплавах / А.Н. Чуканов, В.А. Коротков, А.А. Яковенко // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-koeffitsienta-anizotropii-i-skorosti-lokalnoy-deformatsii-v-additivnyh-splavah (дата обращения: 08.04.2025).

2. **Сундуков С.К.** Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъёмных соединений. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Техполиграфцентр», 2023. 269 с. ISBN 978-5-94385-209-1.

3. **Bai Y.** Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting // Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 299. P. 118. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2021.117328

4. **Li C.** Surface characteristics enhancement and morphology evolution of selective-laser-melting (SLM) fabricated stainless steel 316L by laser polishing // Optics & Laser Technlogy. 2023. Vol. 162. P. 10. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.109246

5. **Shi X.** Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting // Optics & Laser Technology. 2020. Vol. 132. P. 106. DOI:10.1016/j.optlastec.2020.106471

6. **Giorleo L.** Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas // Procedia CIRP. 2015. Vol. 33. P. 446−451. DOI:10.1016/j.procir.2015.06.102

7. **Kumar A.Y.** The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 24. P. 115−124. DOI:10.1016/j.addma.2018.09.021

8. **Popov V.V** Effect of hot isostatic pressure treatment on the electron-beam melted Ti-6Al-4V specimens // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 125−132. DOI:10.1016/j.promfg.2018.02.102

9. **Lyczkowska-Widlak E.** Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. Vol. 14 (4). P.586−594. DOI:10.1016/j.acme.2014.03.001

10. **Jain S.** Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718 // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 34. P. 239−246. DOI:10.1016/j.promfg.2019.06.145

11. **Slegers S.** Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // Coatings. 2017. Vol. 7. P. 208. DOI:10.3390/coatings7120208

12. **Hosseinzadeh A.** Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 68 (2). P. 788−795. DOI:10.1016/j.jmapro.2021.05.070

33. **Nigmetzyanov R.I.** Additive Manufacturing with Ultrasound // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37 (12). P. 1070−1073. DOI:10.3103/S1068798X17120140.

14. **Sundukov S.K.** Ultrasonic Vibration Mechanism in Making Permanent Joints // Steel in Translation. 2024. Vol. 54 (1). P. 10−15. DOI:10.3103/S0967091224700190.

15. **Grigoriev S.N.** et al. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties // Metals. 2020. Vol. 10 (11). P. 1540. DOI 10.3390/met10111540.

16. **Jeon J.H.** et al. Effect of electropolishing on ultrasonic cavitation in hybrid post-processing of additively manufactured metal surfaces // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 120. P. 703−711. DOI:10.1016/j.jmapro.2024.04.092

17. **Wang Q.** et al. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 113. P. 473−481. DOI:10.1007/s00170-021-06666-7

18. **Приходько В.М.** Современные направления ультразвуковой жидкостной обработки в машиностроении / В. М. Приходько, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, Д. С. Фатюхин // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2021. № 8 (122). С. 12−17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-8-12-17. EDN YFXYYC.

19. **Teramachi A.** Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing // Journal of Micro-and Nano-Manufacturing. 2019. Vol. 7 (2). P. 24. DOI:10.1115/1.4043344

20. **Нигметзянов Р.И.** Способы ультразвукового поверхностного пластического деформирования / Р. И. Нигметзянов, В. М. Приходько, С. К. Сундуков [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2022. № 7 (133). С. 33−39. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39. EDN EGTURS.

REFERENCES

1. Chukanov A.N. Determination of the anisotropy coefficient and the rate of local deformation in additive alloys / A.N. Chukanov, V.A. Korotkov, A.A. Yakovenko [et al.] // Izvestiya TulSU. Technical sciences. 2024, no. 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-koeffitsienta-anizotropii-i-skorosti-lokalnoy-deformatsii-v-additivnyh-splavah (date of access: 08.04.2025).

2. Sundukov S.K. Ultrasonic technologies in the processes of obtaining permanent joints. Moscow: Techpoligraftsentr Limited Liability Company, 2023, 269 p. ISBN 978-5-94385-209-1.

3. Bai Y. et al. Evolution mechanism of surface morphology and internal hole defect of 18Ni300 maraging steel fabricated by selective laser melting // Journal of Materials Processing Technology. 2022. Vol. 299. P. 117328. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2021.117328

4. Li C. et al. Surface characteristics enhancement and morphology evolution of selective-laser-melting (SLM) fabricated stainless steel 316L by laser polishing // Optics & Laser Technology. 2023. Vol. 162 P. 109246. DOI:10.1016/j.optlastec.2023.109246

5. Shi X. et al. Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting // Optics & Laser Technology. 2020. Vol. 132. P. 106471. DOI:10.1016/j.optlastec.2020.106471

6. Giorleo L. et al. Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas // Procedia CIRP. 2015. Vol. 33. P. 446−451. DOI:10.1016/j.procir.2015.06.102

7. Kumar A. Y. et al. The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing // Additive Manufacturing 2018. Vol. 24. P. 115−124. DOI:10.1016/j.addma.2018.09.021

8. Popov V. V. et al. Effect of hot isostatic pressure treatment on the electron-beam melted Ti-6Al-4V specimens // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 125−132. DOI:10.1016/j.promfg.2018.02.102

9. Lyczkowska-Widlak E. et al. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. Vol. 14 (4). P. 586−594. DOI:10.1016/j.acme.2014.03.001

10. Jain S. et al. Electrochemical polishing of selective laser melted Inconel 718 // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 34. P. 239−246. DOI:10.1016/j.promfg.2019.06.145

Slegers S. et al. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // Coatings. 2017. Vol. 7. P. 208. DOI:10.3390/coatings7120208

12. Hosseinzadeh A. et al. Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 68 (2). P. 788−795. DOI:10.1016/j.jmapro.2021.05.070

13. Nigmetzyanov R.I. et al. Additive Manufacturing with Ultrasound // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37 (12). P. 1070−1073. DOI:10.3103/S1068798X17120140.

14. Sundukov S. K. Ultrasonic Vibration Mechanism in Making Permanent Joints // Steel in Translation. 2024.Vol. 54 (1). P. 10−15. DOI:10.3103/S0967091224700190.

15. Grigoriev S. N. et al. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties // Metals. 2020. Vol. 10 (11). P. 1540. DOI 10.3390/met10111540.

16. Jeon J. H. et al. Effect of electropolishing on ultrasonic cavitation in hybrid post-processing of additively manufactured metal surfaces // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 120.

Wang Q. et al. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 113. P. 473−481. DOI:10.1007/s00170-021-06666-7

18. Prikhodko V. M. Modern directions of ultrasonic liquid treatment in mechanical engineering / V. M. Prikhodko, R. I. Nigmetzyanov, S. K. Sundukov, D. S. Fatyukhin // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021, no. 8 (122), pp. 12−17. DOI 10.30987/2223-4608-2021-8-12-17. EDN YFXYYC.

19. Teramachi A. et al. Improving the surface integrity of additive-manufactured metal parts by ultrasonic vibration-assisted burnishing // Journal of Micro-and Nano-Manufacturing. 2019. Vol. 7 (2) P. 24. DOI:10.1115/1.4043344

20. Nigmetzyanov R. I. Methods of ultrasonic surface plastic deformation / R. I. Nigmetzyanov, V. M. Prikhodko, S. K. Sundukov [et al.] // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 7 (133), pp. 33−39. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-7-33-39. EDN EGTURS

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 24.04.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 24.04.2025; approved after reviewing 14.05.2025; assepted for publication 19.05.2025.