

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.15-22.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.15-22.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-22

Применение ультразвука в процессе аддитивного производства пластиковых деталей

Равиль Исламович Нигметзянов¹, к.т.н.
Вячеслав Михайлович Приходько², чл.-кор. РАН
Сергей Константинович Сундуков³, к.т.н.
Виктор Александрович Клименко⁴, к.т.н.

Владимир Константинович Кольдюшов⁵, аспирант

^{1, 2, 3, 5} ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский Государственный Университет,
Томск, Россия

¹ lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² prihodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

⁴ klimenko@siberia.design, <https://orcid.org/0000-0002-4112-9690>

⁵ v.koldyushov@list.ru <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Несмотря на огромные перспективы послойного синтеза изделий, позволяющего производить детали уникальной формы, широкому распространению метода препятствуют сложности, связанные с обеспечением микрогеометрии поверхности изделия, которая в связи с особенностями послойного производства имеет высокую шероховатость, а механические методы обработки зачастую не позволяют производить постобработку сложнопрофильных элементов. В статье рассмотрена проблема обеспечения качества поверхностного слоя пластиковых деталей, полученных аддитивными технологиями. С этой целью предлагается использовать технологии ультразвуковой обработки. Проанализированы существующие методы применения ультразвуковых колебаний при производстве пластиковых деталей: изготовление проволоки для 3D-печати с наполнителями, что приводит к повышению механических свойств изделия, и жидкостная обработка погружённого в растворитель изделия с целью удаления поддерживающих элементов. Проведены исследования по финишной обработке деталей в аэрозоле растворителя, полученным методом ультразвукового распыления. Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с обработкой в парах растворителя, полученных при его нагреве, к которым относятся возможность регулирования размера капель, скорости их движения, концентрации аэрозоля за счёт изменения режимов ультразвукового воздействия. В результате экспериментальных исследований установлено, что применение данного способа обработки приводит к повышению качества поверхностей обрабатываемого образца. Снижению высотных параметров шероховатости в направлении, перпендикулярном послойному росту изделия, более чем в десять раз. Механизм изменения микрогеометрии поверхности, следующий: при попадании каплей аэрозоля на поверхность, часть материала, образующего выступы, растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины; после окончания обработки материал полимеризуется, образуя поверхность с улучшенными характеристиками.

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

Для цитирования: Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Клименко В.А., Кольдюшов В.К. Применение ультразвука в процессе аддитивного производства пластиковых деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 15–22. doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-22

The use of ultrasound in the process of plastic parts additive manufacturing

Ravil I. Nigmatzyanov¹, Ph.D. Eng.
Vyacheslav M. Prikhodko², A.M. RAS

Sergey K. Sundukov³, Ph.D. Eng.

Viktor A. Klimenko⁴, Ph.D. Eng.

Vladimir K. Koldyushov⁵, Ph.D. student

^{1, 2, 3, 5} of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ lefmo@yandex.ru

² prikhodko@madi.ru

³ sergey-lefmo@yandex.ru

⁴ klimenko@siberia.design

⁵ v.koldyushov@list.ru

Abstract. Despite huge prospects for the layer-by-layer synthesis of products, which makes it possible to produce parts of a unique shape, the widespread use of the method face the problems of making a proper microgeometry of the product surface, which due to the peculiarities of layer-by-layer production is rather rough, and mechanical methods of machine working often do not admit the possibility of figure-shaped parts post processing. The article studies the problem of ensuring the quality of the plastic parts surface layer obtained by additive technologies. For this purpose, it is proposed to use ultrasonic processing technologies. The existing methods of using ultrasonic vibrations in the production of plastic parts are analyzed: the manufacture of wire for 3D printing with additives, which results in an increase in the mechanical properties of the product. Besides, liquid treatment of a solvent-loaded product in order to remove supporting elements. Studies have been carried out on the finishing of parts in a solvent aerosol obtained by ultrasonic spraying. This method has a number of advantages in comparison with the treatment in solvent vapors obtained during its heating, which include the possibility of regulating the size of droplets, their moving speed, aerosol concentration, caused by changing the modes of ultrasonic treatment. As a result of experimental studies, it is found that the use of this treatment method eventuates an increase in the quality of the sample surfaces to be worked, and besides, it reduces the height parameters of roughness in the direction perpendicular to the layered growth of the product by more than a factor of ten. The mechanism of changing the microgeometry of the surface is as follows: when aerosol droplets contact the surface, part of the material forming the protrusions dissolves and fills valleys, while in the liquid state; after finishing the work, the material polymerizes, generating a surface with improved features.

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

For citation: Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Klimenko V.A., Koldyushov V.K. The use of ultrasound in the process of plastic parts additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 15–22. doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-22

Введение

Технологии аддитивного производства имеют значительные перспективы для развития машиностроения. Возможность создавать детали уникальной геометрической формы, снижение материалоемкости производства, и замена, где это необходимо, процессов сборки соединений на послойную печать соединения целиком – являются основными преимуществами аддитивных технологий по сравнению с традиционным производством, основанном на формообразовании путём удаления материала заготовки [1, 2].

Тем не менее, в настоящее время технологии аддитивного производства не имеют

масштабного и массового применения, что связано с рядом недостатков, обусловленных особенностями послойного производства [3]:

– анизотропия свойств изделия в перпендикулярном и параллельном направлении относительно направления печати;

– погрешность при получении каждого слоя приводит к повышению шероховатости образуемой поверхности;

– сложность с дополнительной обработкой таких поверхностей как металлических, так и пластиковых изделий, особенно в случае со сложной геометрией;

– необходимость использования поддержек, которые после 3D-печати требуется удалить;

– низкая скорость производства изделия;

– высокая стоимость расходных материалов и обслуживания оборудования, и как следствие высокая стоимость изделия.

С точки зрения обеспечения эксплуатационных характеристик изделия наиболее важной является проблема достижения требуемой шероховатости сложнопрофильных участков поверхностей (особенно это касается внутренних каналов и отверстий), где механическая обработка зачастую невозможна. Также всегда актуальны вопросы повышения твёрдости и прочности получаемого изделия.

В данной работе рассмотрены вопросы применения ультразвуковых технологий в процессе аддитивного производства пластиковых деталей с целью повышения механических и геометрических свойств.

Аддитивное изготовление пластиковых объектов

Наибольшее распространение для послойного синтеза пластиковых изделий получил метод FDM-печати (Fused Deposition Modeling) [4]. Процесс FDM-печати производится по схеме на рис. 1. Специальный пластик (ABS или PLA) в форме нити 1 с помощью роликов 2 подаётся в экструдер, состоящий из нагревательного элемента 3 и сопла 4. При этом экструдер осуществляет перемещения по координатам, соответствующим 3D-модели изготавливаемой детали 5, поделённой на слои с помощью специальной программы. Температура в экструдере задаётся немного выше температуры плавления используемого пластика, в результате чего он расплавляется на выходе из сопла и полимеризуется практически сразу после нанесения на предыдущие слои.

Особенностью изготовленных деталей является ячеистое заполнение внутренней части, что позволяет сократить время изготовления и расход пластика.

Таким способом можно изготавливать модели, применяемые для визуализации технических решений. В этом случае используется ячеистое заполнение внутренней части детали, снижается расход пластика и уменьшается время печати.

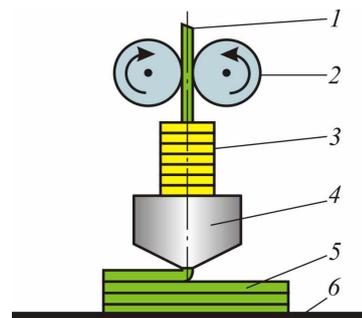


Рис. 1. Схема экструдирования при FDM-печати:

1 – проволока; 2 – ролики; 3 – нагревательный элемент; 4 – сопло экструдера; 5 – изготавливаемая деталь; 6 – подложка

Fig. 1. The extrusion scheme for FDM printing:

1 – wire; 2 – rollers; 3 – heating element; 4 – extruder nozzle; 5 – manufactured part; 6 – substrate

Также изготавливаются детали типа кронштейнов, крышек, фитингов и т. д. различного назначения. В данном случае для обеспечения прочности детали требуется значительно увеличить плотность заполнения её внутренней части, что приводит к увеличению времени изготовления и повышению расхода применяемого пластика.

При этом остаётся вопрос обеспечения требуемой микрогеометрии функциональных поверхностей изделий.

С целью повышения механических свойств полимерных изделий широко применяется добавление различных наполнителей, в качестве которых применяются порошки металлов, графит, шунгит, углеродные нанотрубки и т. д. [5, 6]. При затвердевании состава они являются дополнительными центрами полимеризации, что упорядочивает структуру полимера.

В лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ проведены экспериментальные исследования по добавлению в нити ABS-пластика алюминиевой пудры [7]. Нарезанная на небольшие части проволока из ABS-пластика KUMHO ABS 750 засыпалась в ёмкость 200 мл, которая подогревалась до его температуры плавления 190 °С. В расплавленный пластик добавлялось 10 % алюминиевой пудры по массе. В полученную смесь погружался излучатель стержневой магнитострикционной колебательной системы, запитанной от генератора УЗГ 2,0/22. Амплитуда колебаний составляла 30 мкм, время обработки 10 с.

При выбранном высокоамплитудном режиме обработки возникают крупномасштабные акустические течения, которые равномерно распределяют наполнитель по обрабатываемому объёму. Помимо этого, частички алюминиевой пудры являются очагами кавитации, что способствует расщеплению макромолекул и дефрагментации полимерных цепочек [8], что дополнительно снижает вязкость смеси и упрощает обработку. После полимеризации смесь делилась на части, и с помощью шнекового экструдера Filabot Original производилась проволока требуемого диаметра. Печать образцов (кубик) из полученной проволоки на 3D-принтере PICASO 3D Designer печатались кубики $10 \times 10 \times 5$ мм. Фотографии поверхности контрольного и исследуемого образцов представлены на рис. 2.

Поверхность образца с изготовленной проволокой имеет меньшую высоту выступов и меньше выраженные границы между слоями, что объясняется уменьшением времени застывания пластика после выхода из сопла экструдера за счёт содержания алюминия и созданием центров полимеризации вокруг частиц алюминиевой пудры.

Увеличению твёрдости составило порядка 50 %, что позволит изготавливать изделия с повышенной прочностью при меньшей заполняемости внутренней части детали.

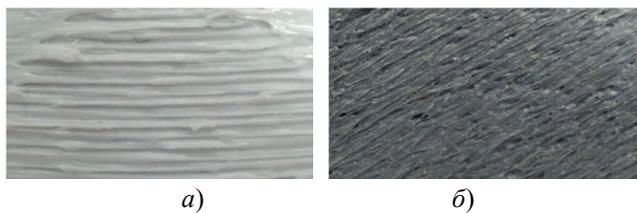


Рис. 2. Фотографии ($\times 20$) образцов:

a – 100 % ABS-пластик; *б* – 90 % ABS-пластик, 10 % алюминиевая пудра

Fig. 2. Photos ($\times 20$) of samples:

a – 100 % ABS plastic; *b* – 90 % ABS plastic, 10 % aluminum powder

В работе [9] проведены исследования по ультразвуковой жидкостной обработке пластиковых образцов в среде растворителя с целью удаления поддержек, расположенных в труднодоступных местах. Фотографии образцов, имитирующих поддержки, растворяемые в различных условиях, представлены на рис. 3.

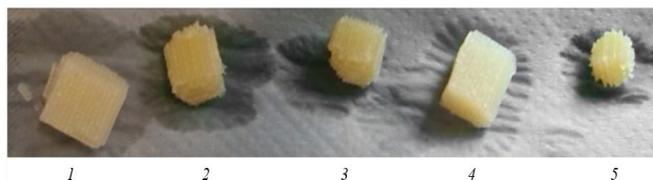


Рис. 3. Опытные образцы материала после 1,0 ч процессов растворения:

1 – с 10 мл деминерализованной воды; *2* – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды; *3* – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды выдерживали при 30 °С; *4* – с 10 мл деминерализованной воды, помещенной в ультразвуковую ванну (при 30 °С) на 2×15 мин с промежутком 45 мин; *5* – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды, с помещением в ультразвуковую ванну (при 30 °С) на 2×15 мин с промежутком 45 мин

Fig. 3. Prototypes of the material after 1,0 h of dissolution processes:

1 – with 10 ml of demineralized water; *2* – 0,6 g of NaOH dissolved in 10 ml of demineralized water; *3* – 0,6 g of NaOH dissolved in 10 ml of demineralized water was kept at 30 °С; *4* – with 10 ml of demineralized water placed in an ultrasonic bath (at 30 °С) for 2×15 minutes with an interval of 45 minutes; *5* – 0,6 g of NaOH dissolved in 10 ml of demineralized water, placed in an ultrasonic bath (at 30 °С) for 2×15 minutes with an interval of 45 minutes

Лучший результат показала обработка ультразвуком в растворе гидроксида натрия NaOH (образец 5). Обработка при резонансной частоте 45 кГц привела к потере массы с 1,0 до 0,32 г, в то время как без ультразвука масса образца составила 0,47 г. Сделан вывод, что в результате интенсификация химической реакции, а также возможности направленного действия ультразвука, предлагаемый способ эффективен для удаления поддержек при 3D-печати.

Также метод объёмной ультразвуковой обработки в жидкой среде известен для обеспечения качества поверхностей металлических изделий [10]. Направленное ударное воздействие абразивных частиц в условиях кавитации и акустических течений позволяют разрушать выступы микронеровностей и удалять застывшие мелкие брызги, образованные в процессе плавления порошка металла, с обрабатываемой поверхности.

Для снижения шероховатости пластиковых деталей данный метод не применяется, т. к. приведёт к значительной потере материала с поверхностей изделия, контактирующих с растворителем. Для повышения геометрических

свойств применяется метод «глянцевания», заключающийся в выдержке изделия в парах растворителя. В результате контакта с каплями аэрозоля происходит частичное растворение пластика на поверхности изделия. Недостатками данного метода являются необходимость нагрева растворителя, что увеличивает его химическую активность и не даёт возможность длительной обработки, что снижает эффективность при обработке сложнопрофильных внутренних элементов поверхности.

В данном случае предлагается использовать аэрозоль, полученный ультразвуковым распылением.

Преимущества ультразвукового распыления

Механизм распыления слоя жидкости описывается кавитационно-волновой теорией [11]. Согласно этой теории, распыление осуществляется путем отрыва капелек жидкости с гребней стоячих волн, параметрически возбуждаемых на поверхности раздела сред жидкость-воздух вследствие возмущения поверхности жидкости при пульсации и захлопывании кавитационных пузырьков (рис. 4).

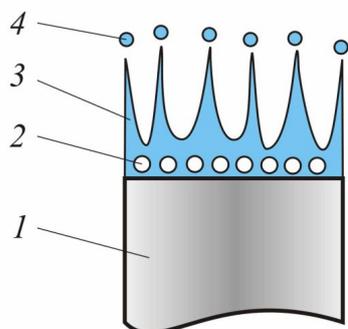


Рис. 4. Механизм образования капель аэрозоля:
1 – излучатель; 2 – кавитационные пузырьки; 3 – капиллярные волны; 4 – капли аэрозоля

Fig. 4. Aerosol droplet formation mechanism:
1 – emitter; 2 – cavitation bubbles; 3 – ripple waves; 4 – aerosol droplets

Таким образом, основным эффектом, определяющим процесс распыления жидкости, является кавитация. В результате зависимости количества кавитационных пузырьков и их активности от амплитуды и частоты колебаний обеспечивается возможность за счёт изменения

параметров режима колебаний изменять дисперсность капель аэрозоля, скорость их движения и концентрацию аэрозоля. При этом для распыления не требуется повышенной температуры.

Методика проведения экспериментальных исследований

На 3D-принтере PICASO 3D Designer из ABS-пластика KUMHO ABS 750 на одинаковых режимах печатались два образца в виде кубиков $20 \times 20 \times 20$ мм с двумя пересекающимися отверстиями диаметром 5,0 мм. Один образец выбирался как контрольный, второй обрабатывался в аэрозоле, полученном методом ультразвукового распыления ацетона по схеме, представленной на рис. 5.

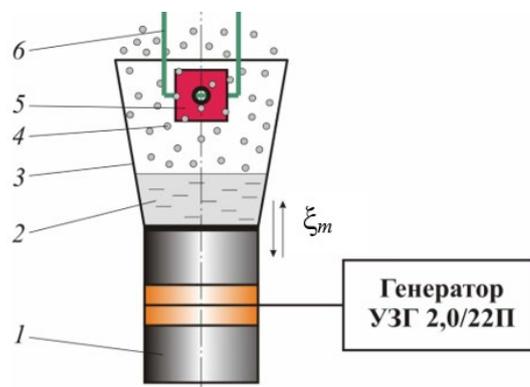


Рис. 5. Схема обработки:
1 – пьезокерамический преобразователь; 2 – ацетон; 3 – стеклянный излучатель; 4 – капли аэрозоля; 5 – образец; 6 – подвес

Fig. 5. Treatment pattern:
1 – piezoceramic converter; 2 – acetone; 3 – glass emitter; 4 – aerosol droplets; 5 – sample; 6 – suspension

Ультразвуковая колебательная система представляла собой полуволновой пьезокерамический преобразователь 1 и приклеенный к нему стеклянный излучатель 3 конусообразной формы и расширяющийся кверху. Питание колебательной системы осуществлялось от генератора УЗГ 2,0/22П, имеющему функцию автоматической подстройки частоты, что необходимо для поддержания резонансного режима колебаний при изменении уровня распыляемой жидкости (в данном случае ацетона 2). Резонансная частота составляла 22 300 Гц, амплитуда колебаний 5,0 мкм. Образец 5 с помощью подвеса 6 размещался на уровне ниже верхнего края излучателя и выше уровня ацетона. При

включении генератора с поверхности ацетона отрывались капли, образуя аэрозоль 4, потребляемая генератором мощность при этом составляла порядка 50 Вт. Обработка производилась в течение 10 с.

Далее боковая поверхность образца, которая является образующей для сложнопрофильных элементов, исследовалась с помощью микроскопа и профилометра.

Результаты и обсуждение

Поверхность образца сразу после печати имеет технологическую наследственность в виде ярко выраженного чередования слоёв, перепады между которыми приводят к повышению шероховатости. После предлагаемого способа обработки в аэрозоле, полученным ультразвуковым распылением, материал на поверхности частично растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины микронеровностей, что приводит к снижению шероховатости. В этом случае на поверхности визуально заметны «наплывы», являющиеся областями

взаимодействия поверхности и капелек растворителя.

Фотографии поверхности образцов представлены на рис. 6.

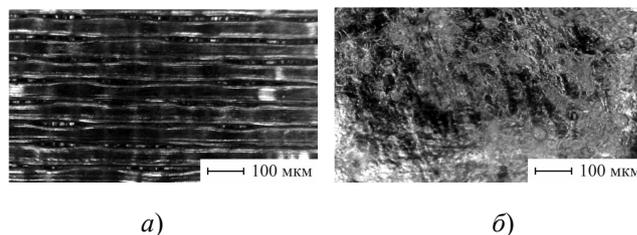
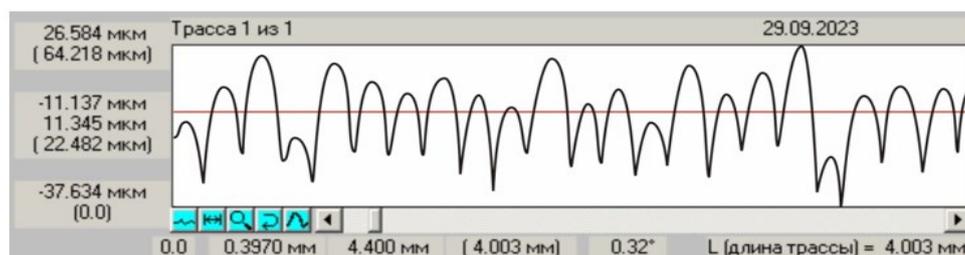


Рис. 6. Фотографии боковой поверхности образцов после:

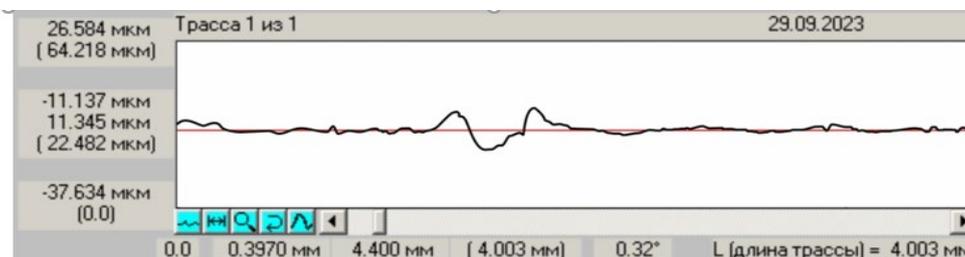
a – 3D-печати; *б* – обработки в аэрозоле, полученном ультразвуковым распылением

Fig. 6. Photographs of sample side surface after having: *a* – 3D printing; *b* – aerosolizing, obtained through ultrasonic spraying

Количественные показатели изменения шероховатости и профилограммы поверхности представлены на рис. 7. Измерения проводились профилометром модели 130 при движении иглы в направлении, перпендикулярном направлению послойного роста изделия.



a)



б)

Рис. 7. Профилограммы и параметры шероховатости боковой поверхности образцов после:

a – 3D-печати: $R_a = 22,7$ мкм; $R_z = 85,8$ мкм; $S_m = 0,414$ мм; $S = 0,174$ мм; *б* – обработки в аэрозоле, полученном ультразвуковым распылением: $R_a = 1,34$ мкм; $R_z = 6,9$ мкм; $S_m = 0,213$ мм; $S = 0,007$ мм

Fig. 7. Profilograms and roughness parameters of sample side surface after having:

a – 3D printing: $R_a = 22,7$ mkm; $R_z = 85,8$ mkm; $S_m = 0,414$ mm; $S = 0,174$ mm; *b* – aerosolizing, obtained through ultrasonic spraying: $R_a = 1,34$ mkm; $R_z = 6,9$ mkm; $S_m = 0,213$ mm; $S = 0,007$ mm

В результате обработки в аэрозоле растворителя происходит снижение высотных параметров шероховатости: среднего арифметического отклонения профиля Ra в 17 раз, высоты неровностей профиля по десяти точкам Rz в 12 раз. В результате происходит значительное повышение качества поверхности. Снижение шаговых параметров Sm и S связано с изменением положения средней линии, т. е. в расчёте параметров учитывается большее количество выступов маленького размера, образованных в результате растворения и дальнейшей полимеризации материала.

Выводы

В результате экспериментальных исследований по финишной обработке пластиковых деталей, изготовленных методом FDM-печати, в аэрозоле растворителя, полученным методом ультразвукового распыления, установлено что:

- метод эффективен для снижения шероховатости сложнопрофильных участков поверхности;
- механизм изменения микрогеометрии поверхности, следующий: при попадании капель аэрозоля на поверхность, часть материала, образующего выступы, растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины; после окончания обработки материал полимеризуется, образуя поверхность с улучшенными характеристиками;
- снижение высотных параметров шероховатости составляет более, чем в 10 раз;
- широкие возможности управления параметрами получаемого в результате ультразвукового распыления аэрозоля позволяют использовать метод для различных задач в зависимости от геометрии обрабатываемой поверхности, начальной и требуемой шероховатости;
- отсутствие нагрева растворителя снижает его химическую активность (по сравнению с аэрозолем, полученным в результате испарения растворителя), что дает возможность проведения более тонкой обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dilberoglu U.M. et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0 // *Procedia manufacturing*. 2017. V. 11. P. 545–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.

2. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends // *Additive Manufacturing Handbook*. 2017. P. 149–168. DOI: 10.1080/00207543.2015.1115909.

3. Конов С.Г., Котобан Д.В., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2015. № 9 (51). С. 28–34.

4. Gordelier T.J. et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: A state-of-the-art review // *Rapid Prototyping Journal*. 2019. T. 25. Iss. 6. P. 953–971. DOI: 10.1108/RPJ-07-2018-0183.

5. Тимофеева А.Г., Баурова Н.И. Перспективы применения вторичных нетканых материалов в качестве армирующего наполнителя композитов в машиностроении // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2023. № 1. С. 29–32. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-1-29-32.

6. Волченкова, А.А., Галкина Е.А., Баурова Н.И. Оценка влияния условий хранения дисперсных и волокнистых наполнителей на свойства композитов на их основе // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2023. № 2. С. 27–31. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-2-27-31.

7. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. [и др.] Пути совершенствования аддитивных технологий с помощью ультразвука // *СТИН*. 2017. № 7. С. 2–6.

8. Сундуков С. К. Подготовка эпоксидного клея методом ультразвуковой обработки // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2023. № 9. С. 32–40. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401.

9. Bram Verhaagen, Thijs Zanderink, David Fernandez Rivas. Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and Cleaning Challenge Devices // *Applied Acoustics*. Vol. 103, Part B. 2016. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.06.010

10. Александров В.А., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С., Филатова А.А. Ультразвуковые способы повышения качества поверхности изделий, полученных методом селективного лазерного плавления порошков коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 6 (756). С. 42–47.

11. Slegers S. et al. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // *Coatings*. 2017. V. 7. Iss. 12. P. 208. DOI: doi.org/10.3390/coatings7120208.

REFERENCES

1. Dilberoglu U.M. et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0 // *Procedia manufacturing*. 2017. V. 11. P. 545–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.

2. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends // *Additive*

Manufacturing Handbook. 2017. P. 149–168. DOI: 10.1080/00207543.2015.1115909.

3. Konov S.G., Korban D.V., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Prospects of ultrasonic technologies application for additive manufacturing // Scienceintensive technologies in mechanical engineering, 2015, No. 9 (51), pp. 28–34.

4. Gordelier T.J. et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: A state-of-the-art review // Rapid Prototyping Journal. 2019. T. 25. Iss. 6. P. 953–971. DOI: 10.1108/RPJ-07-2018-0183.

5. Timofeeva A.G., Baurova N.I. Prospects for the use of recycled nonwoven fabric as a reinforcing filler of composites in mechanical engineering industry // All the Materials. Encyclopedic Reference Book, 2023, No. 1, pp. 29–32. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-1-29-32.

6. Volchenkova, A.A., Galkina E.A., Baurova N.I. An evaluation of the influence of storage conditions for dispersed and fibrous fillers on the properties of composites based on them // All the Materials. Encyclopedic Reference Book, 2023, No. 2, pp. 27–31. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-2-27-31.

7. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. [et al.] Ways of improving additive technologies using ultrasound // STIN, 2017, No. 7, pp. 2–6.

8. Sundukov S. K. Preparation of epoxy glue by ultrasonic treatment // Glues. Sealants. Technologies, 2023, No. 9, pp. 32–40. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401.

9. Bram Verhaagen, Thijs Zanderink, David Fernandez Rivas. Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and Cleaning Challenge Devices // Applied Acoustics. Vol. 103, Part B. 2016. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.06.010

10. Alexandrov V.A., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S., Filatova A.A. Ultrasonic methods for improving object surface quality prepared by corrosion-resistant steel powder selective laser melting // Metal Science and Heat Treatment, 2018., No. 6 (756), pp. 42–47.

11. Slegers S. et al. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // Coatings. 2017. V. 7. Iss. 12. P. 208. DOI: doi.org/10.3390/coatings7120208.

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 02.10.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 12.10.2023; assepted for publication 20.10.2023.

