

УДК 678.745.32:004.925:661.727.4

Е. И. Кордикова, Г. Н. Дьякова, В. Б. Ходер, В. Е. Смян
Белорусский государственный технологический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРОВ АЦЕТОНА НА КАЧЕСТВО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАПЕЧАТАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В условиях роста популярности аддитивных технологий и широкого применения 3D-печати в различных отраслях – от промышленности до медицины – вопрос обеспечения высокого качества поверхности напечатанных изделий становится все более актуальным. Целью исследования является анализ влияния паров ацетона на качество поверхности 3D-печатных деталей из акрилонитрилбутадиенстирола (ABS).

В ходе эксперимента использовались напечатанные образцы из ABS-пластика. Они помещались в специально сконструированную камеру, где создавалась атмосфера горячих паров ацетона. Температура внутри нее поддерживалась на уровне 56°C, что является оптимальным для растворения верхнего слоя ABS-пластика без ухудшения его структурной целостности. Установка оснащена датчиком температуры и системой вывода паров ацетона, что предотвращает передержку и обеспечивает безопасность процесса.

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса обработки напечатанных образцов парами ацетона горячим методом установлено, что изменение параметров шероховатости с течением времени и скорость сглаживания имеют нелинейную зависимость. Для получения глянцевой поверхности с показателями шероховатости $Ra = 0,2$ мкм и $Rz = 1$ мкм достаточно 10 мин. Процесс сглаживания оказался довольно эффективным для снижения шероховатости на 90%. Однако следует отметить, что данная обработка также приводит к нежелательному сглаживанию острых ребер, что может быть критично для некоторых применений.

Полученные экспериментальные зависимости показателей шероховатости поверхности от времени выдержки в горячих парах ацетона и скорости процесса сглаживания могут быть полезны для оценки эффективности химической постобработки поверхности ацетоном и определения требуемой степени обработки. Это исследование демонстрирует важность точного контроля времени обработки, так как чрезмерная выдержка может привести к избыточному сглаживанию и потере критических геометрических характеристик.

Текущие результаты стимулируют дальнейшие исследования в области усовершенствования технологии химической обработки поверхностей, а также разработки новых систем контроля и оптимизации параметров обработки, что способствует повышению качества и расширению применения 3D-печатных изделий в различных сферах.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ABS, постобработка, качество поверхности, ацетон, профилограмма.

Для цитирования: Кордикова Е. И., Дьякова Г. Н., Ходер В. Б., Смян В. Е. Экспериментальное исследование влияния паров ацетона на качество боковой поверхности напечатанных изделий // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283). С. 176–183. DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-20.

E. I. Kordikova, H. N. Dyakova, V. B. Khodzer, V. E. Smeyan
Belarusian State Technological University

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ACETONE VAPORS ON THE QUALITY OF THE SIDE SURFACE OF THE PRINTED PRODUCTS

With the growing popularity of additive technologies and the widespread use of 3D printing in various industries – from industry to medicine – the issue of ensuring high surface quality of printed products is becoming increasingly relevant. The aim of the study is to analyze the effect of acetone vapor on the surface quality of 3D printed parts made of acrylonitrile butadiene styrene (ABS).

During the experiment, printed samples made of ABS plastic were used. They were placed in a specially designed chamber, where an atmosphere of hot acetone vapors was created. The temperature inside it was maintained at 56°C, which is optimal for dissolving the upper layer of ABS plastic without compromising its structural integrity. The unit is equipped with a temperature sensor and an acetone vapor extraction system, which prevents overexposure and ensures the safety of the process.

As a result of the experimental studies of the process of processing printed samples with acetone vapors by the hot method, it was found that the change in roughness parameters over time and the smoothing

rate have a nonlinear dependence. It takes 10 minutes to obtain a glossy surface with roughness values of $Ra = 0.2$ microns and $Rz = 1$ microns. The smoothing process proved to be effective enough to reduce roughness by 90%. However, it should be noted that such processing also leads to undesirable smoothing of sharp edges, which may be critical for some applications.

The obtained experimental dependences of surface roughness indicators on the exposure time in hot acetone vapors and the speed of the smoothing process can be useful for evaluating the effectiveness of chemical post-treatment of the surface with acetone and determining the required degree of treatment. This study demonstrates the importance of precise control of processing time, as excessive exposure can lead to excessive smoothing and loss of critical geometric characteristics.

The current results stimulate further research in the field of improving the technology of chemical surface treatment, as well as the development of new control systems and optimization of processing parameters, which will contribute to improving the quality and expanding the use of 3D printed products in various fields.

Keywords: additive technologies, ABS, post-treatment, surface quality, acetone, profilogram.

For citation: Kordikova E. I., Dyakova H. N., Khodzer V. B., Smeyan V. E. Experimental study of the effect of acetone vapors on the quality of the side surface of the printed products. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2 (283), pp. 176–183 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-20.

Введение. Моделирование методом последовательной укладки расплавленного слоя из термопластичных материалов (FDM – Fused Deposition Modeling) – самый популярный процесс 3D-печати [1, 2].

В качестве расходных материалов широкое применение приобрели полимеры на основе стиролов, в частности акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) из-за своих универсальных свойств и хорошего соотношения показателей цена-качество [3, 4].

В результате создания по технологии послойной укладки объекты имеют характерную слоистую структуру поверхностей с возможным искажением геометрии и точности размеров конечных деталей [5], вызванных послойным нанесением, а высота ступеньки соответствует шагу построения (рис. 1) [6–9].

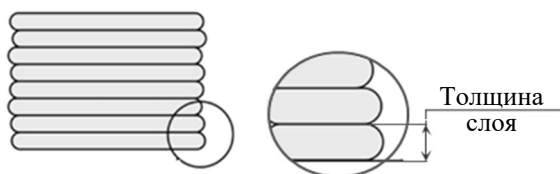


Рис. 1. Послойный принцип построения модели

Качество поверхности прототипа зачастую зависит от ориентации модели на рабочей платформе [10]. В некоторых исследованиях сообщается, что толщина слоя и ориентация детали так же являются важными факторами, влияющими на шероховатость поверхности изделий, напечатанных на 3D-принтере [11–13].

При этом нет теоретической модели, которая могла бы описать функциональную зависимость шероховатости поверхности образца [14] от параметров процесса печати.

Несколько авторов изучали влияние параметров 3D-печати на среднюю шероховатость поверхности (Ra) боковых стенок, полученную при моделировании методом FDM. Установлено, что низкая температура, высокая скорость 3D-печати, среднее заполнение, малая толщина слоя рекомендуются для снижения Ra при 3D-печати изделий из акрилонитрилбутадиенстирола [15].

Низкое качество поверхности, в частности слоистости боковой части, отличает напечатанные изделия от полученных по традиционным технологиям, например, литьем под давлением. Для того чтобы улучшить ситуацию, часто требуется дополнительная обработка изделий после 3D-печати – постобработка [5].

Необходимость последующей обработки зависит от назначения изделия, размеров модели, материала, типа технологии, выбранной при изготовлении прототипа.

Некоторые из методов финишной обработки включают шлифование, холодную сварку, заполнение зазоров, полировку, покраску, нанесение дополнительного эпоксидного покрытия и т. п. [16].

Наиболее эффективной считается химическая обработка поверхности растворителем при непосредственном контакте или в его парах, в этом случае деталь находится в атмосфере испарений вещества. Известны композиции растворителей для сглаживания неровностей поверхности различных полимерных материалов: ацетон, этилацетат, дихлорэтан и др.

Проведены исследования, посвященные использованию химических растворителей (таких как ацетон) для улучшения качества поверхности напечатанных деталей из ABS-пластика [11, 12, 17]. Этот процесс дешевле, быстрее и дает лучший результат [18, 19]. Однако до сих пор

имеется мало информации о влиянии ацетона как растворителя на рельеф поверхности при сглаживании деталей из ABS-пластика под действием пара.

В исследованиях [20–23] изучены различные методы обработки деталей из ABS-пластика парами ацетона. Отмечается, что обработка ацетоном приводит к значительному снижению шероховатости поверхности деталей без существенного изменения размеров при оптимальных параметрах обработки. Исследования выявили оптимальные параметры сглаживания при разной длительности обработки ацетоном, с разными углами печати и количеством циклов [24]. Однако следует отметить, что обработка ацетоном также влияет на механические свойства деталей [17] и точность их размеров, что требует дальнейших исследований для оптимизации процесса с учетом всех факторов.

В литературных источниках нет четкого определения времени обработки ABS-пластика парами ацетона, что связано, вероятно, с изменяющимся соотношением входящих в сополимер компонентов. Поэтому необходимо проводить эксперименты для конкретного полимера от определенного производителя для установления зависимостей.

Основная часть. В представленной работе приведены результаты исследований изменения качества поверхности образцов из ABS-пластика, напечатанных по технологии FDM, при выполнении химической постобработки выдержкой в парах ацетона.

Для проведения исследований изготовили образцы из ABS-пластика фирмы Alfa-Filament на 3D-принтере Ultimaker 3. Образцы представляли собой кубики со сторонами 50 мм при горизонтальном расположении и печатались на грани со 100%-ным заполнением и направлением движения головки при укладке слоев $\pm 45^\circ$.

Печать осуществляли при температуре экструдера 220°C и подогреве стола до 70°C со скоростью 60 мм/с и толщиной слоя 0,2 мм.

Для снижения слоистости боковой поверхности напечатанных образцов применяли химическую постобработку в парах ацетона горячим методом в специально разработанной для этого экспериментальной установке (рис. 2).

Установка представляет собой прозрачный бокс, который состоит из двух отделений. В нижнем находится контейнер с ацетоном (200 мл), верхний предназначен для расположения образцов в подвешенном состоянии или на решетке так, чтобы пары ацетона свободно проходили через отверстия и обрабатывали изделия со всех сторон равномерно. Контейнер с растворителем устанавливается на разогретую поверхность в основании установки, которая поддерживает температуру кипения ацетона 56°C с точностью 1°C .

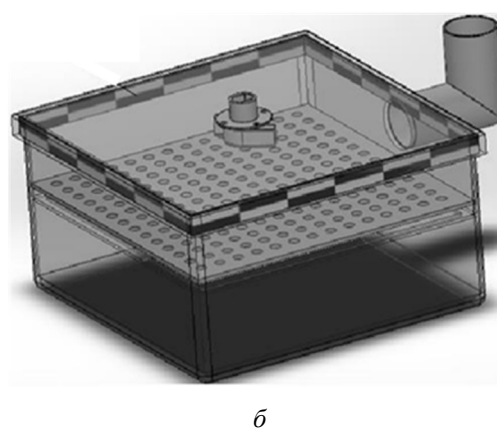
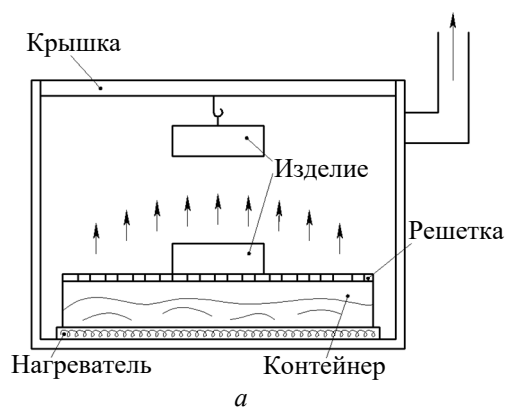


Рис. 2. Экспериментальная установка: а – схема; б – 3D-модель

В верхней крышке контейнера с растворителем закреплен вентилятор, подключенный к источнику питания.

Вентилятор функционирует в качестве средства распределения образующегося пара по объему бокса. Крышка бокса имеет отверстие для вывода паров растворителя через подключенную в вытяжную вентиляцию выводную трубу. Работа установки обязательно осуществляется в вытяжном шкафу.

Съемная решетка позволяет при необходимости проводить обработку растворителем методом прямого погружения.

После обработки в парах ацетона образцы извлекают из ванны и оставляют для просушки с целью предотвращения появления коробления и отпечатков на размягченной поверхности.

Для изучения влияния продолжительности воздействия паров растворителя на качество поверхности записывали профилограммы в направлении синтеза образцов и определяли параметры шероховатости.

Запись профилограммы осуществляли с использованием профилографа «СЕЙТРОНИК ПШ8-1» методом непосредственного контакта с измеряемой поверхностью (рис. 3).

Действие прибора основано на принципе ощупывания неровностей контролируемой

поверхности алмазной иглой щупа датчика и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этим колебаниям.

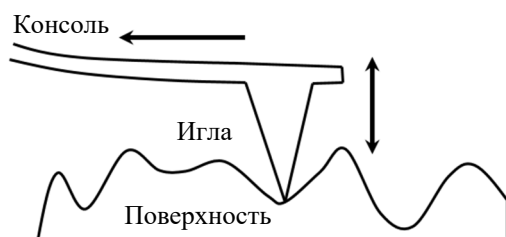


Рис. 3. Движение щупа на шероховатой поверхности

В качестве измерительного инструмента использовался алмазный наконечник с углом наклона 90° и радиусом 0,010 мм. Скорость перемещения щупа находится в пределах $(1,00 \pm 0,05)$ мм/с. Максимальная длина оценки (базовая длина) равна 12,5 мм.

Максимальное значение статического измерительного усилия составляет 0,004 Н.

Определение параметров шероховатости производили по системе средней линии (ГОСТ 25142–82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения») в соответствии с номенклатурой и соотношениями значений парамет-

ров, предусмотренными ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».

Результат эксперимента оценивали по сравнению шероховатостей поверхности напечатанной детали до и после химической обработки.

Наибольшая продолжительность выдержки в парах ацетона ограничивалась оплыванием и деформацией формы образцов, определяемых визуально. Запись профилограмм и установление параметров шероховатости проводили с интервалом 30 с.

На рис. 4 представлены характерные профилограммы, которые отражают этапы сглаживания боковой поверхности напечатанного изделия.

На рис. 4, а показана профилограмма для начального образца, где наблюдается характерный ступенчатый эффект деталей, напечатанных методом FDM (рис. 5). Величина шага выступов соответствует толщине слоя. Значение отклонений профиля Ra в пределах базовой длины составляет 13,70 мкм, $Rz = 58,3$ мкм. При этом высота пиков колеблется от 15 до 28 мкм, что указывает на смещение слоев при печати.

С увеличением времени выдержки в среде паров ацетона до 2 мин (рис. 4, б) поверхности начинают сглаживаться, а параметры шероховатости уменьшаются до значений $Ra = 7,8$ мкм и $Rz = 38,8$ мкм.

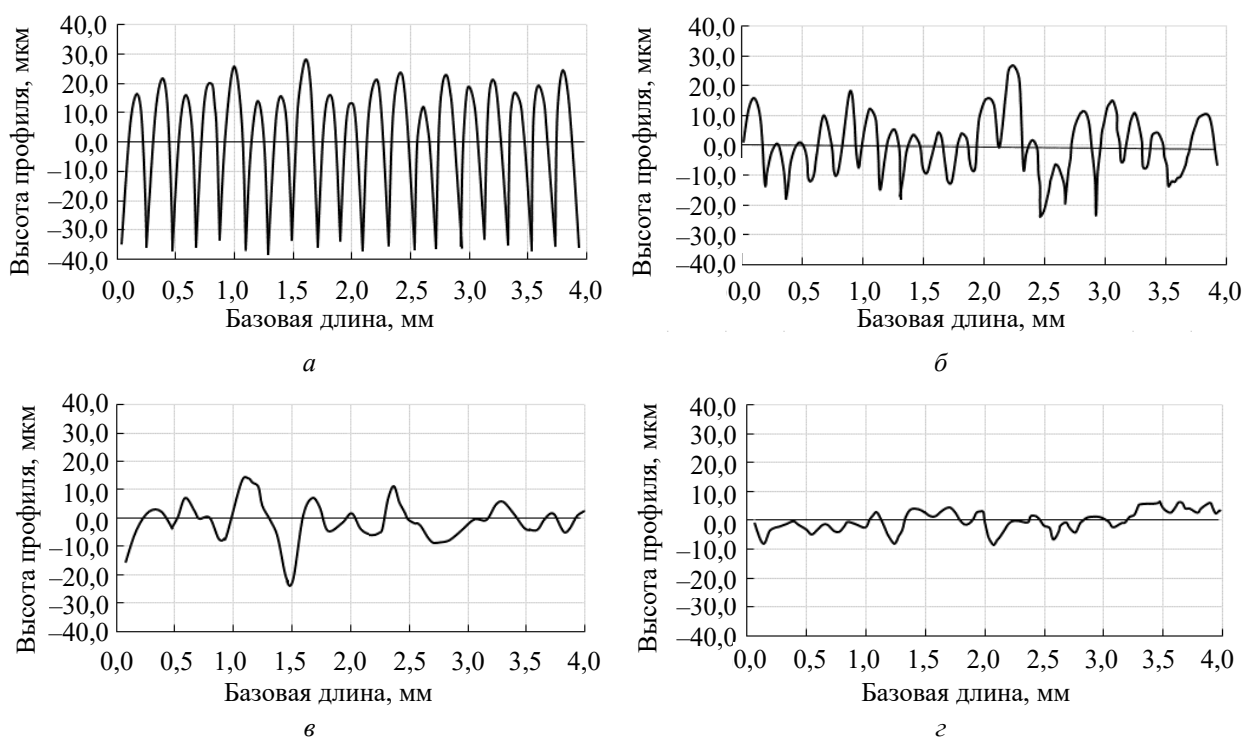


Рис. 4. Профилограммы поверхности в зависимости от времени выдержки в парах ацетона:
 а – исходный образец; б – время выдержки 2 мин;
 в – время выдержки 5 мин; г – время выдержки 10 мин

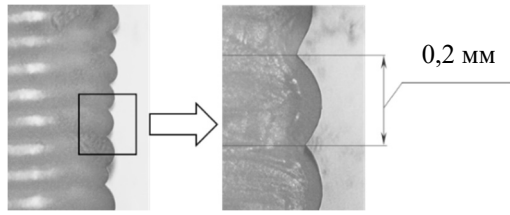


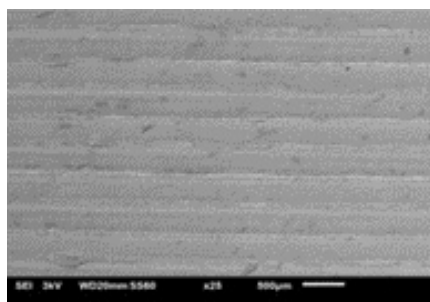
Рис. 5. Боковая поверхность напечатанного образца

Выдержка на протяжении 5 мин приводит к расплавлению выступов и «стеканию» некоторого количества материала во впадины. При этом в отдельных местах наблюдается увеличение R_{max} , что указывает на «протравливание» поверхности, т. е. проникание ацетона вглубь образца по поверхности контакта между слоями (рис. 4, в). При этом Rz снижается до 11 мкм, а Ra – до 2,2 мкм. Профиль поверхности образца выравнивается.

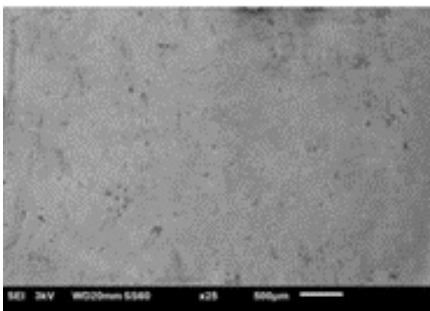
В результате выдержки в парах ацетона в течение 10 мин получается выглаженная глянцевая поверхность (рис. 4, г) с показателем $Ra = 0,1-0,2$ мкм.

Дальнейшее увеличение времени обработки парами при изучении профилограмм не дает существенного изменения по качеству поверхности, однако наблюдается образование микропузырей под тонким поверхностным слоем, а также нежелательное закругление ребер и углов.

На рис. 6 изображены поверхности образцов с видимыми линиями слоев до обработки (рис. 6, а) и результат воздействия паров ацетона (рис. 6, б). На фотографии заметны сглаживание поверхности, исчезновение слоистости и наличие микропузырей на поверхности.



а



б

Рис. 6. Поверхность образца: а – до обработки; б – после обработки

Изменение основных показателей шероховатости от времени выдержки в парах ацетона представлено на рис. 7. С величиной достоверности аппроксимации экспериментальных данных 0,98 установлена снижающаяся экспоненциальная зависимость указанного параметра.

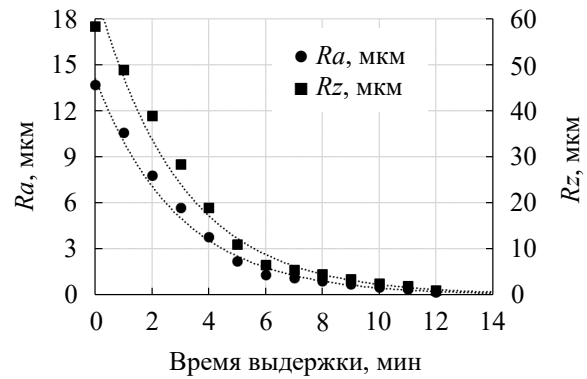


Рис. 7. Изменение параметров шероховатости с течением времени

График зависимости изменения показателей шероховатости позволяет установить закон изменения величины и в последующем рассчитать время выдержки для получения заданной шероховатости поверхности.

Скорость прохождения процесса сглаживания определяется одновременным протеканием растворения и оплывания поверхности, поэтому можно характеризовать скорость изменения высоты профиля при постоянных внешних условиях.

Скорость изменения параметра находится как:

$$v = \frac{\Delta Rz}{\Delta t},$$

где v – скорость сглаживания, мкм/с; ΔRz – изменение параметра шероховатости; Δt – приращение по времени, с.

При увеличении продолжительности выдержки образцов в парах ацетона скорость процесса экспоненциально снижается, выходя на плато (рис. 8).

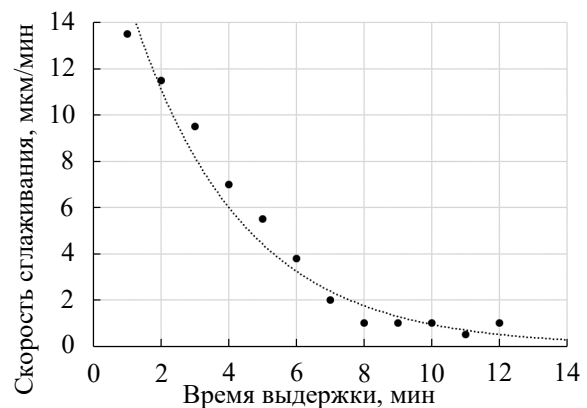


Рис. 8. Скорость изменения высоты неровностей профиля

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований процесса обработки напечатанных образцов парами ацетона горячим методом установлено, что изменение параметров шероховатости с течением времени и скорость сглаживания имеют нелинейную зависимость. С целью получения глянцевого покрытия с показателями шероховатости $Ra = 0,2$ мкм и $Rz = 1$ мкм достаточно 8 мин.

Результаты могут быть полезны для оценки эффективности сглаживания поверхности ацетоном и определения требуемой степени обработки, поскольку, несмотря на простоту, регулировать процесс сложно.

Для того чтобы избежать передержки изделий в ацетоне, необходимо установить датчик регулирования температуры нагрева ацетона и таймер, а также предусмотреть вывод ацетона из камеры обработки и достаточную вентиляцию помещения.

Список литературы

1. Зотов О. Ю., Фролов Д. А. Особенности метода изготовления изделий путем послойного наплавления материала // Ученый XXI века. Технические науки. 2016. № 1. С. 7–11.
2. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О. Н. Гончарова [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. С. 1–12.
3. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing / G. Narendran, Tanikella [et al.] // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 15. P. 40–47.
4. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing / S. Ligon [et al.] // Chemical Reviews. 2017. Vol. 117, no. 15. P. 10212–10290.
5. Effect of post-process treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process / Lan Cao [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2023. Vol. 41. P. 135–143.
6. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Издательство политехнического университета, 2013. 222 с.
7. Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12Х18Н10Т / И. В. Горбатов [и др.] // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. № 1. С. 59–67.
8. Galantucci L. M., Lavecchia F., Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts // CIRP Annals Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58, no. 1. P. 189–192.
9. Zhang S. Numerical evaluation of ABS parts fabricated by fused deposition modeling and vapor smoothing // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2017. Vol. 2, no. 6. P. 157–161.
10. Куликов М. Ю., Ларионов М. А., Гусев Д. В. Исследование взаимосвязи шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2 (50). С. 108–111.
11. Chohan J. S., Singh R. Pro and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications // Rapid Prototyping Journal. 2017. No. 3. P. 495–513.
12. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications / J. S. Chohan [et al.] // Composites. Part B: Engineering. 2017. Vol. 117. P. 138–149.
13. Sensitivity of RP surface finish to process parameter variation / B. Vasudevarao [et al.] // Solid Freeform Fabrication Proceedings. 2000. P. 251–258.
14. Vasilescu M. D., Groza I. V. Influence of technological parameters on the roughness and dimension of flat parts generated by FDM 3D printing // Nonconventional Technologies Review. 2017. Vol. 21, no. 3. P. 18–23.
15. Investigation on the Scale Factor applicable to ABS based FDM Additive Manufacturing / H. Rahman [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. P. 1640–1648.
16. Постобработка моделей после 3D печати // 3D-DIY. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/postobrabotka-modelej-posle-3d-pechati/> (дата обращения: 10.03.2024).
17. Якубович Д. И., Васеничева А. В. Снижение шероховатости поверхности изделий из пластика ABS, полученных методом аддитивных технологий // Вестник Белорусско-Российского университета. 2021. № 3 (72). С. 99–107.
18. Investigation of post processing techniques to reduce the surface roughness of fused deposition modeled parts / A. S. Rao [et al.] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2012. Vol. 3 (3). P. 531–544.
19. Garg A., Bhattacharya A., Batish A. On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment // Materials and Manufacturing Processes. 2016. Vol. 31 (4). P. 522–529.
20. Garg A., Bhattacharya A., Batish A. Effect of cold vapour treatment on geometric accuracy of fused deposition modelling Parts // Rapid Prototyping Journal. 2017. Vol. 23, no. 6. P. 1226–1236.

21. Lalehpour A., Janeteas C., Barari A. Surface Roughness of FDM Parts after Post-Processing with Acetone Vapor Bath Smoothing Process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 95. P. 1505–1520.
22. Singh J., Singh R., Singh H. Investigations for improving the surface finish of FDM based ABS replicas by chemical vapor smoothing process: a case study // *Assembly Automation*. 2017. Vol. 37, no. 1. P. 13–21.
23. Neff C., Trapuzzano M., Crane N. B. Impact of Vapor Polishing on Surface Quality and Mechanical Properties of Extruded ABS // *Rapid Prototyping Journal*. 2018. Vol. 24, no. 2. P. 501–508.
24. Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process / R. Singh [et al.] // *Composites. Part B: Engineering*. 2017. Vol. 111. P. 228–234.

References

1. Zotov O. Yu., Frolov D. A. Features of the method of manufacturing products by layer-by-layer deposition of material. *Uchenyy XXI veka. Tekhnicheskiye nauki* [Scientists of the XXI century. Technical sciences], 2016, no. 1, pp. 7–11 (In Russian).
2. Goncharova O. N., Berezhnoy Yu. M., Bessarabov E. N., Kadamov E. A., Gaynutdinov T. M., Nagopet'yan E. M., Kovina V. M. Additive technologies – dynamically developing production. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, no. 4, pp. 1–12 (In Russian).
3. Tanikella G. Nagendra, Wittbrodt B., Pearce M. Joshua. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 15, pp. 40–47.
4. Ligon S., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mülhaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*, 2017, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290.
5. Lan Cao, Jianhua Xiao, Jin Kuk Kim, Xiaojie Zhang. Effect of post-process treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, vol. 41, pp. 135–143.
6. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylina I. N. *Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. St. Petersburg, Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2013. 222 p. (In Russian).
7. Gorbatov I. V., Orlov Yu. A., Antyufeev V. A., Tel'gerekova T. V., Orlova N. Yu. Determination of the geometric accuracy and surface roughness of small-sized round and square-section parts obtained depending on the location in the working space of the printer using selective laser melting technology made of steel grade 12X18H10T. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey"* [Bulletin of the East Kazakhstan Region "Almaz – Antey" Concern], 2019, no. 1, pp. 59–67 (In Russian).
8. Galantucci L. M., Lavecchia F., Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, no. 1, pp. 189–192.
9. Zhang S. Numerical evaluation of ABS parts fabricated by fused deposition modeling and vapor smoothing. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2017, vol. 2, no. 6, pp. 157–161.
10. Kulikov M. Yu., Larionov M. A., Gusev D. V. Investigation of the relationship between the surface roughness of prototyped samples and the conditions of their basing during manufacture. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2016, no. 2 (50), pp. 108–111 (In Russian).
11. Chohan J. S., Singh R. Pro and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, no. 3, pp. 495–513.
12. Chohan J. S., Singh R., Boparai K. S., Penna R., Fraternali F. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications. *Composites. Part B: Engineering*, 2017, vol. 117, pp. 138–149.
13. Vasudevarao B., Natarajan D. P., Henderson M., Razdan A. Sensitivity of RP surface finish to process parameter variation. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2000, pp. 251–258.
14. Vasilescu M. D., Groza I. V. Influence of technological parameters on the roughness and dimension of flat parts generated by FDM 3D printing. *Nonconventional Technologies Review*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 18–23.
15. Rahman H., John T., Sivadasan M., Singh N. Investigation on the Scale Factor applicable to ABS based FDM Additive Manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, pp. 1640–1648.
16. Post-processing of models after 3D printing. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/post-obrabotka-modelej-posle-3d-pechati/> (accessed 10.03.2024) (In Russian).
17. Yakubovich D. I., Vasenicheva A. V. Reduction of surface roughness of ABS plastic products obtained by additive technologies. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2021, no. 3 (72), pp. 99–107 (In Russian).
18. Rao A. S., Dharap M. A., Venkatesh J. V., Ojha D. Investigation of post processing techniques to reduce the surface roughness of fused deposition modeled parts. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2012, vol. 3 (3), pp. 531–544.

19. Garg A., Bhattacharya A., Batish A. On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31 (4), pp. 522–529.

20. Garg A., Bhattacharya A., Batish A. Effect of cold vapour treatment on geometric accuracy of fused deposition modelling Parts. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, vol. 23, no. 6, pp. 1226–1236.

21. Lalehpour A., Janeteas C., Barari A. Surface Roughness of FDM Parts after Post-Processing with Acetone Vapor Bath Smoothing Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 95, pp. 1505–1520.

22. Singh J., Singh R., Singh H. Investigations for improving the surface finish of FDM based ABS replicas by chemical vapor smoothing process: a case study. *Assembly Automation*, 2017, vol. 37, no. 1, pp. 13–21.

23. Neff C., Trapuzzano M., Crane N. B. Impact of Vapor Polishing on Surface Quality and Mechanical Properties of Extruded ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 501–508.

24. Singh R., Singh S., Singh J., Fabbrocino F., Fraternali F. Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. *Composites. Part B: Engineering*, 2017, vol. 111, pp. 228–234.

Информация об авторах

Кордикова Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kordikova@belstu.by

Дьякова Галина Николаевна – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kravchenyagn1994@gmail.com

Ходер Виктория Богуславовна – аспирант кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vh58998673194@gmail.com

Смян Вероника Евгеньевна – инженер кафедры механики и конструирования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: verunya.smeyan@mail.ru

Information about the authors

Kordikova Elena Ivanovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kordikova@belstu.by

Dyakova Halina Nikolaevna – Master of Engineering, Senior Lecturer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kravchenyagn1994@gmail.com

Khodzer Viktoriya Boguslavovna – PhD student, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vh58998673194@gmail.com

Smeyan Veronika Evgen'yevna – engineer, the Department of Mechanics and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: verunya.smeyan@mail.ru

Поступила 14.06.2024