

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 67.017

EDN: OPPOEU

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-322-335



Экспериментальное исследование различных способов постобработки пластиковых деталей, изготовленных методом 3D-печати

Д.Ю. Левин^{1✉}, М.Е. Подшибякин², О.А. Рябинина³, А.И. Болдырев⁴

¹⁻⁴Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Резюме: Цель работы – провести сравнительный анализ и оценку методов обработки поверхностей пластиковых изделий, изготовленных с использованием технологии 3D-печати методом Fused Deposition Modelling (моделирование методом послойного наплавления). Экспериментальные исследования производились на образцах, изготовленных из ABS-пластика с помощью различных инструментов физической, термической и химической обработки, таких как: электрического гравера с абразивными кругами крупной и мелкой зернистости, фетрового полировального круга и абразивной пасты, бор-фрезы; ацетона, дихлорметана (метилена хлористого); паяльного фена; полупроводникового лазерного гравера NEJE Master с регулировкой мощности лазерного излучения. Изучение проводилось с помощью оптического портативного и цифрового микроскопов. Основное внимание в статье было уделено практическому рассмотрению существующих методов обработки поверхности изделий из ABS-пластика, их недостаткам и преимуществам. В результате проведенного сравнительного анализа методов обработки поверхностей изделий из ABS-пластика была проведена визуальная оценка результатов обработки поверхности различными методами по нескольким критериям. Сравнение проводилось среди полученных типов поверхностей, четкости слоев, однородности поверхности, степени деформации, наличию царапин/трещин, раковин, наплывов, вздутий. Их сравнение было проведено на основе выдвинутых критериев. Сравнительный анализ различных методов обработки показал, что наилучший результат полученного качества был достигнут при обработке поверхности с помощью лазерного излучения. Показано, что данный метод имеет недостаток, который заключается в необходимости предварительной настройки лазера и потенциальной сложности обработки объемных деталей. Результаты данного исследования можно применять в машиностроении при изготовлении деталей с использованием аддитивных технологий для управления качеством поверхности пластиковых изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, FDM, ABS-пластик, постобработка, методы обработки, качество поверхности

Для цитирования: Левин Д.Ю., Подшибякин М.Е., Рябинина О.А., Болдырев А.И. Экспериментальное исследование различных способов постобработки пластиковых деталей, изготовленных методом 3D-печати // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 322–335. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-322-335>. EDN: OPPOEU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Experimental study of different methods for post-processing plastic parts manufactured by 3D printing

Dmitrii Yu. Levin^{1✉}, Maksim E. Podshibyakin², Olga A. Riabinina³, Aleksander I. Boldyrev⁴

¹⁻⁴Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The article aims to compare and evaluate methods for surface treatment of plastic products manufactured using 3D printing technology, namely by fused deposition modelling (layer-by-layer FDM). The experimental studies were conducted on ABS plastic samples using various tools for physical, thermal, and chemical processing. These included an electric engraver with coarse and fine grain grinding wheels, a felt polishing wheel and abrasive paste, burrs; acetone, dichloromethane (methylene chloride); a heat gun; a NEJE Master semiconductor laser engraver with adjustable laser power. The study was conducted utilizing portable optical and digital microscopes. The article focuses on the existing methods for surface treatment of ABS plastic products and

highlights their advantages and disadvantages. In order to compare the methods of surface treatment of ABS plastic products, a visual assessment of the results of surface treatment by various methods was carried out according to several criteria. We compared the obtained types of surfaces, printer resolution (i. e., layer thickness and X-Y resolution), surface uniformity, degree of deformation, presence of scratches/cracks, cavities, buildups, and blisters employing the proposed criteria. The comparative analysis of various processing methods demonstrated that the best result in terms of quality was achieved with surface treatment using laser radiation. However, this method was shown to have a drawback which is the need for preliminary laser adjustment and the potential complexity of processing three-dimensional parts. The results of the present study can be applied in mechanical engineering when manufacturing parts using additive technologies to manage the surface quality of plastic products.

Keywords: additive technologies, 3D printing, FDM, ABS plastic, post-processing, machining techniques, surface quality

For citation: Levin D.Yu., Podshibyakin M.E., Riabinina O.A., Boldyrev A.I. Experimental study of different methods for post-processing plastic parts manufactured by 3D printing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):322-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-322-335>. EDN: OPPOEU.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время множество приборов различной конфигурации изготавливается методом 3D-печати, так как этот метод позволяет существенно снизить вес компонентов, улучшить их прочностные характеристики и оптимизировать геометрию изделий, что особенно важно для условий эксплуатации в аэрокосмической отрасли. 3D-печать также обеспечивает высокую степень свободы в проектировании, позволяя создавать сложные и уникальные конструкции, которые невозможно получить традиционными методами литья или механической обработки. Использование специализированных полимеров и композитов с наполнителями (например, углеродонаполненные или металлонаполненные пластики) расширяет диапазон эксплуатационных характеристик, таких как термостойкость и устойчивость к агрессивным средам. Кроме того, данный подход способствует сокращению производственных затрат и времени на изготовление деталей за счет минимизации отходов материалов и быстрой адаптации к изменениям в конструкции изделия. Поэтому важное значение имеет изучение и развитие способов работы с деталями, получаемыми данным типом производства, включая их постобработку, контроль качества, обеспечение надежности в условиях экстремальных нагрузок и температур, а также интеграцию в существующие технологические процессы авиакосмического приборостроения [1–4].

В рамках данного исследования особое внимание будет уделено сравнительному анализу методов постобработки пластиковых деталей, полученных аддитивными технологиями, включая механическую шлифовку, химическое сглаживание и термическую об-

работку. С помощью лабораторного оборудования проведено качественное сравнение, которое позволит оценить изменения шероховатости и выявить критические дефекты, влияющие на эксплуатационную долговечность. Полученные данные позволяют выработать обоснованные рекомендации по выбору оптимального способа постобработки для снижения волнистости и шероховатости 3D-печатных компонентов, улучшить визуальные качества изделия.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Современные технологии аддитивного производства, такие как FDM (от англ. Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления), произвели революционные изменения в области проектирования и изготовления изделий. FDM – одна из самых популярных технологий 3D-печати, она очень проста: сложные объекты создаются из расплавленного пластика, выдавленного через сопло. Намотанная на катушку пластиковая нить, разматываясь, подается в экструзионное сопло, при этом управляемый компьютером механизм перемещает само сопло и/или объект вдоль трех осей. После выдавливания материал моментально затвердевает [5, 6]. Эта методика предоставила новые возможности для создания сложных геометрических форм и функциональных компонентов при минимальных затратах времени и материальных ресурсов. FDM позволила внедрить производственные процессы, которые раньше считались технически или экономически невозможными, особенно в условиях индивидуального и мелкосерийного производства [7, 8].

Среди материалов, используемых в технологии FDM, акрилонитрил-бутадиен-стирол

(ABS) – трехсоставной сополимер нефтехимического происхождения [9] – занимает особое место благодаря своим выдающимся механическим характеристикам, термостойкости и экономичности. Материал также обладает высокой химической устойчивостью и механической прочностью, что делает его незаменимым в различных отраслях, включая автомобилестроение, производство электронной и медицинской техники [10–12].

Тем не менее детали, изготовленные из ABS методом FDM, характеризуются присущими этому процессу недостатками: выраженной слоистостью, наличием мелких дефектов и поверхностной неоднородностью. Эти недостатки объясняются природой самого метода: послойное наплавление приводит к формированию заметных швов и неоднородностей, что особенно критично в случаях, когда изделие подвергается высокому механическому или химическому воздействию. Более того, шероховатость поверхности может затруднять дальнейшую обработку и ухудшать эстетическое восприятие деталей, что делает необходимым использование технологий постобработки. Такие дефекты не только влияют на внешний вид изделий, но и могут снижать их долговечность и функциональность, особенно в условиях высоких нагрузок или агрессивных сред [13–17].

В настоящее время для постобработки деталей из ABS применяется широкий спектр методов, включая механическое шлифование, химическое сглаживание с использованием растворителей, термическое выравнивание и использование лазерного

излучения. Каждый из этих подходов обладает специфическими преимуществами, ограничениями и имеет свои области применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данной статьи была проведена сравнительная оценка методов обработки поверхности изделий из ABS, полученных при помощи 3D-печати методом FDM.

На первом этапе был выбран материал для проведения анализа – филамент компании eSUN. Характеристики рассматриваемого филамента представлены в табл. 1.

Из данного пластика с помощью 3D-принтера были напечатаны заготовки (рис. 1), поверхность которых была обработана различными методами, рассмотренными далее в рамках проведенного эксперимента.



Рис. 1. Заготовки из акрилонитрил-бутадиен-стирола
Fig. 1. Acrylonitrile butadiene styrene workpieces

Таблица 1. Характеристики филамента
Table 1. Filament characteristics

Производитель	eSUN
Тип пластика	ABS
Температура экструдера	240–270°C
Температура стола	90–110°C
Скорость печати	40–300 мм/с
Плотность	1,06 г/см ³
Температура теплового искажения	94,9°C, 0,45 МПа
Показатель текучести	1,42 г/мин
Предел прочности	29,9 МПа
Относительное удлинение	5,7%
Прочность на изгиб	76,2 МПа
Модуль упругости на изгиб	2694 МПа
Ударная вязкость	3,5 кДж/м ²

В качестве начального этапа рассмотрена поверхность заготовки без обработки. В дальнейшем для более подробного рассмотрения будут использованы микроскопы: оптический портативный (рис. 2 а), позволяющий получить 30-кратное увеличение, и цифровой (рис. 2 б), дающий увеличение в 100 раз.

Поверхности заготовки без обработки под разным увеличением приведены на рис. 2.

Как можно заметить, поверхность заготовки без обработки достаточно слоиста, четко виден каждый слой. Даже без увеличения заметно, что поверхность неоднородна, так как между слоями имеются канавки, при увеличении это видно отчетливее. На верхней поверхности слои наиболее равномерны, но они все также различимы.

Следующим шагом была обработка поверхности заготовок с использованием различных методик.

Первым методом обработки была механическая в различных вариациях. Обработка была проведена с помощью электрического гравера TASP с использованием гибкого вала для удобства обработки.

Первая заготовка была обработана с использованием абразивных кругов диаме-

тром 14 мм крупной (R80) и мелкой (R240) зернистости на скорости 15000 об/мин.

Часть поверхности заготовки, обработанная с помощью абразивного круга крупной зернистости, представлена на рис. 3.

Оставшаяся часть поверхности заготовки, обработанная с помощью абразивного круга мелкой зернистости, представлена на рис. 4.

Обработка при помощи абразивного круга различной зернистости визуально показала примерно одинаковый результат. Слоистость пропала, но появились визуально заметные царапины, так как абразив царапает и вырывает материал, получая крошку, но в случае с крупным зерном материал вырывает сильнее и царапины получаются глубже.

Следующая заготовка была обработана с использованием фетрового полировального круга (диаметром 14 мм, толщиной 6 мм) и дополнительно с использованием абразивной пасты DREMEL 14 (зернистость 400) на скорости 12000 об/мин.

Части поверхности заготовки, обработанные полировальным кругом и кругом с нанесением абразивной пасты, показаны на рис. 5, 6 соответственно.

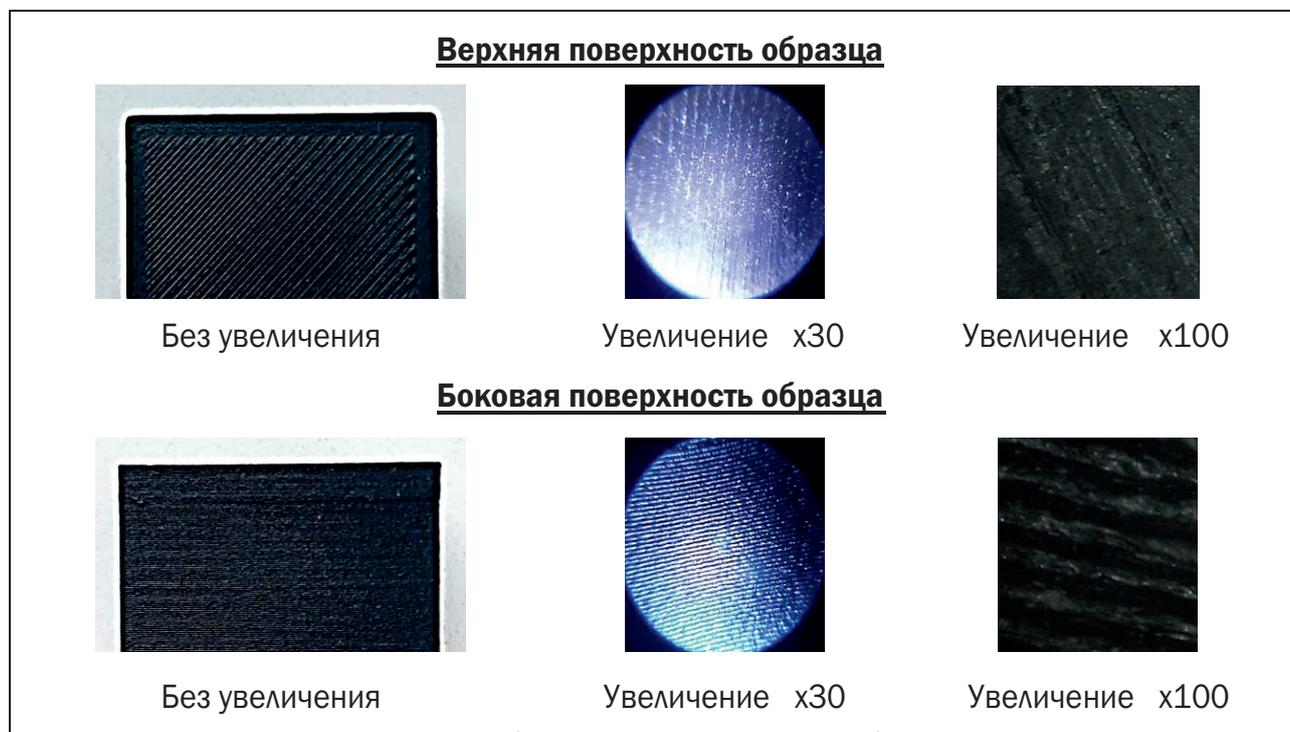


Рис. 2. Заготовка без обработки
Fig. 2. Workpiece without machining

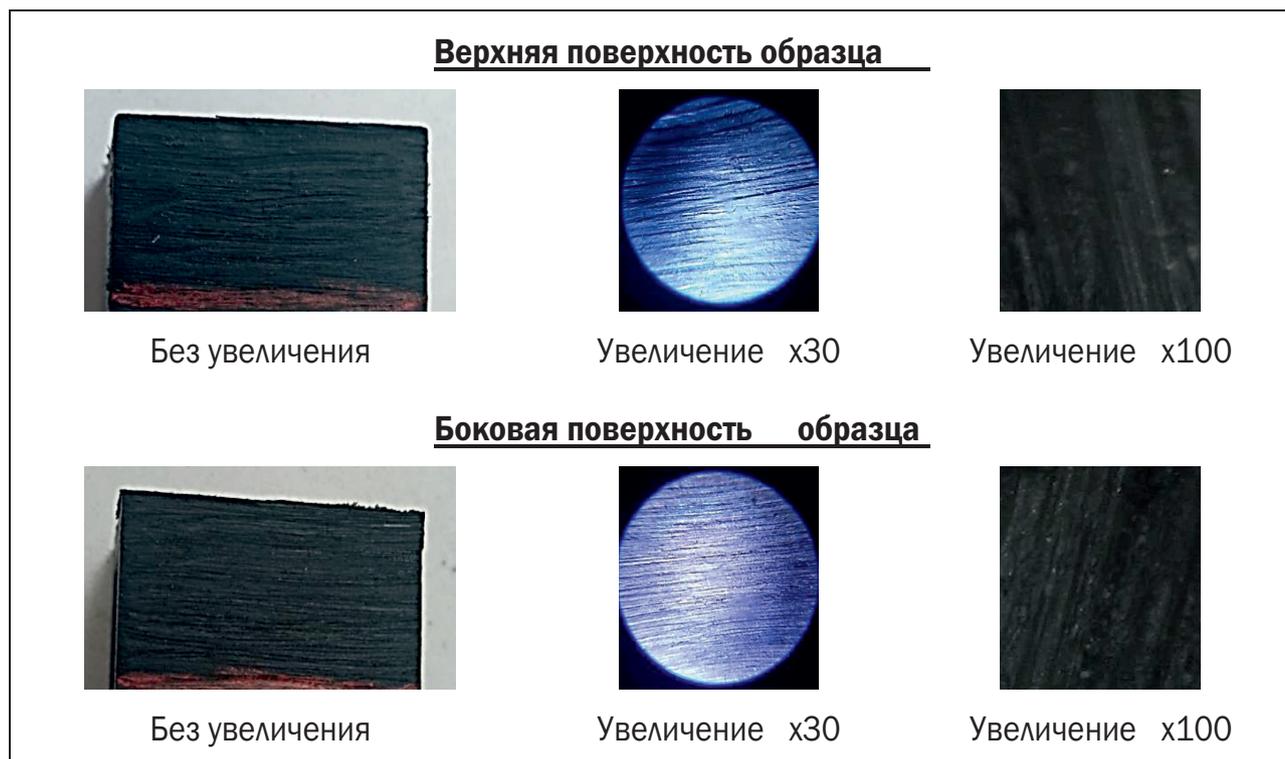


Рис. 3. Часть заготовки, обработанная абразивным кругом крупной зернистости
Fig. 3. Part of the workpiece processed with a coarse-grained abrasive wheel

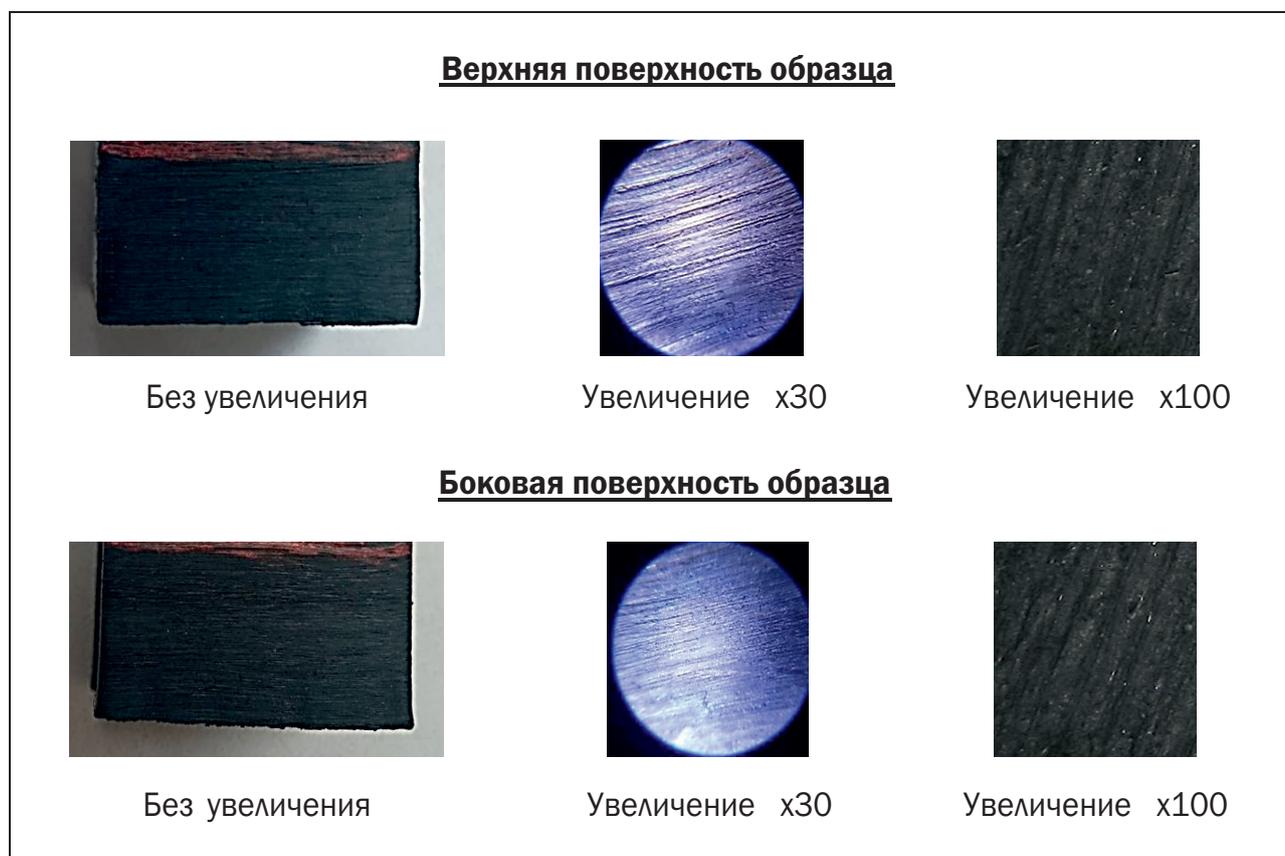


Рис. 4. Часть заготовки, обработанная абразивным кругом мелкой зернистости
Fig. 4. Part of the workpiece processed with a fine-grained abrasive wheel



Рис. 5. Часть заготовки, обработанная полировальным кругом
Fig. 5. Part of the workpiece machined with a polishing wheel

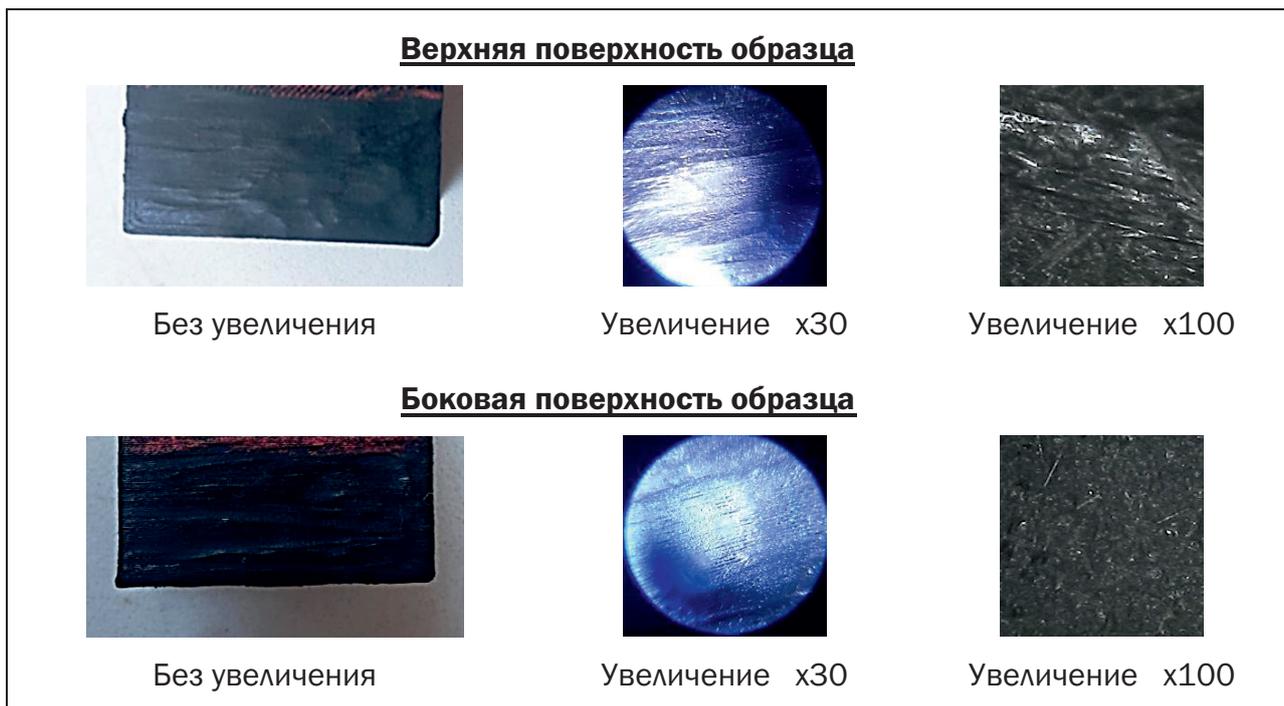


Рис. 6. Часть заготовки, обработанная полировальным кругом с абразивной пастой
Fig. 6. Part of the workpiece machined with a polishing wheel with abrasive paste

Можно заметить, что оба варианта схожи, но необходимо подчеркнуть, что полировка с пастой была проще в применении и наиболее контролируема, о чем говорит меньшее количество раковин и наплывов мате-

риала. Поверхность в каждом из вариантов однотипна, но в случае с абразивной пастой появился характерный блеск, и при увеличении можно отметить определенную однородность обрабатываемой поверхности.

Последняя заготовка в механическом методе была обработана при помощи борфрезы с алмазным напылением. Поверхности, обработанные с помощью борфрезы, представлены на рис. 7.

Обработка борфрезой визуально показала хороший результат. Как и с обработкой шлифовальным кругом, на поверхности имеются царапины, но не такие глубокие и четкие, однако на боковой поверхности царапины более выражены, также на ней имеются раковины.

Химическая обработка была произведена следующим методом. В качестве реагентов использованы ацетон и дихлорметан (метилен хлористый). Обработка происходила нанесением реагента на поверхность заготовки в несколько слоев, с ожиданием полного высыхания предыдущего нанесения.

Заготовки, обработанные ацетоном и дихлорметаном, представлены на рис. 8, 9 соответственно.

Как можно заметить, обработка поверхности ацетоном практически ничего не изменила. При увеличении можно отметить, что слои стали более гладкими, а сам пластик – матовым.

Обработка дихлорметаном привела к растворению поверхности, которая сглади-

лась, но местами слоистость еще различима. Из-за воздействия реагента появилась пузыристость поверхности, но незначительная.

Следующие заготовки были обработаны термическим методом. Обработка проводилась при помощи паяльного фена, позволяющего производить нагрев до 450 °С.

В рамках анализа была рассмотрена обработка поверхности при воздействии температуры в 400 °С. Поверхности, полученные при температурном воздействии, продемонстрированы на рис. 10.

Во время термического воздействия на поверхность произошло спекание слоев, отчего поверхность стала немного гладкой, но наблюдались вздутие и деформация слоев. Также стоит отметить, что поверхность стала глянцевой и при увеличении напоминает стекло.

Последним рассматриваемым методом была обработка поверхности лазерным излучением. Обработка проходила на лазерном гравере NEJE Master с лазерной головкой на 3,5 Вт. Дополнительно гравер был помещен в специальный корпус с вытяжной системой для отвода газов, возникающих при сгорании слоев пластика [18–20].

Для проведения обработки необходимо подобрать скоростной режим и мощность лазер-

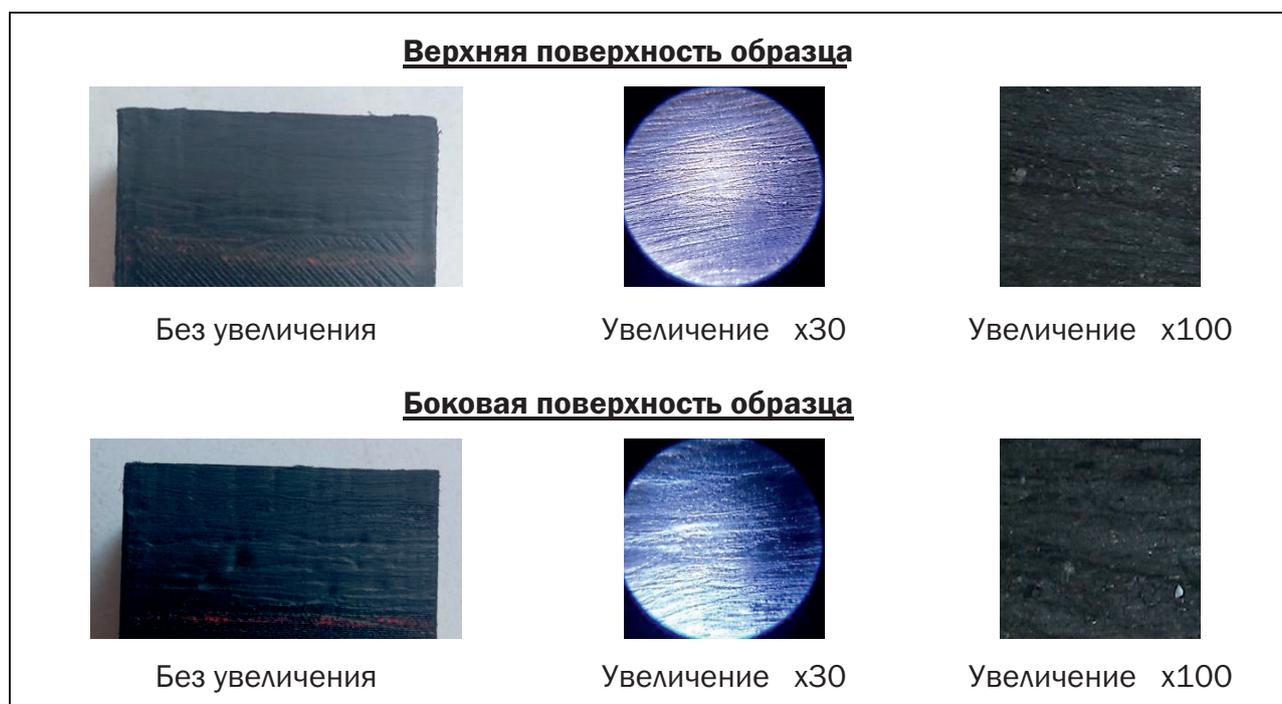


Рис. 7. Заготовка, обработанная борфрезой
Fig. 7. Burr cutter-machined workpiece

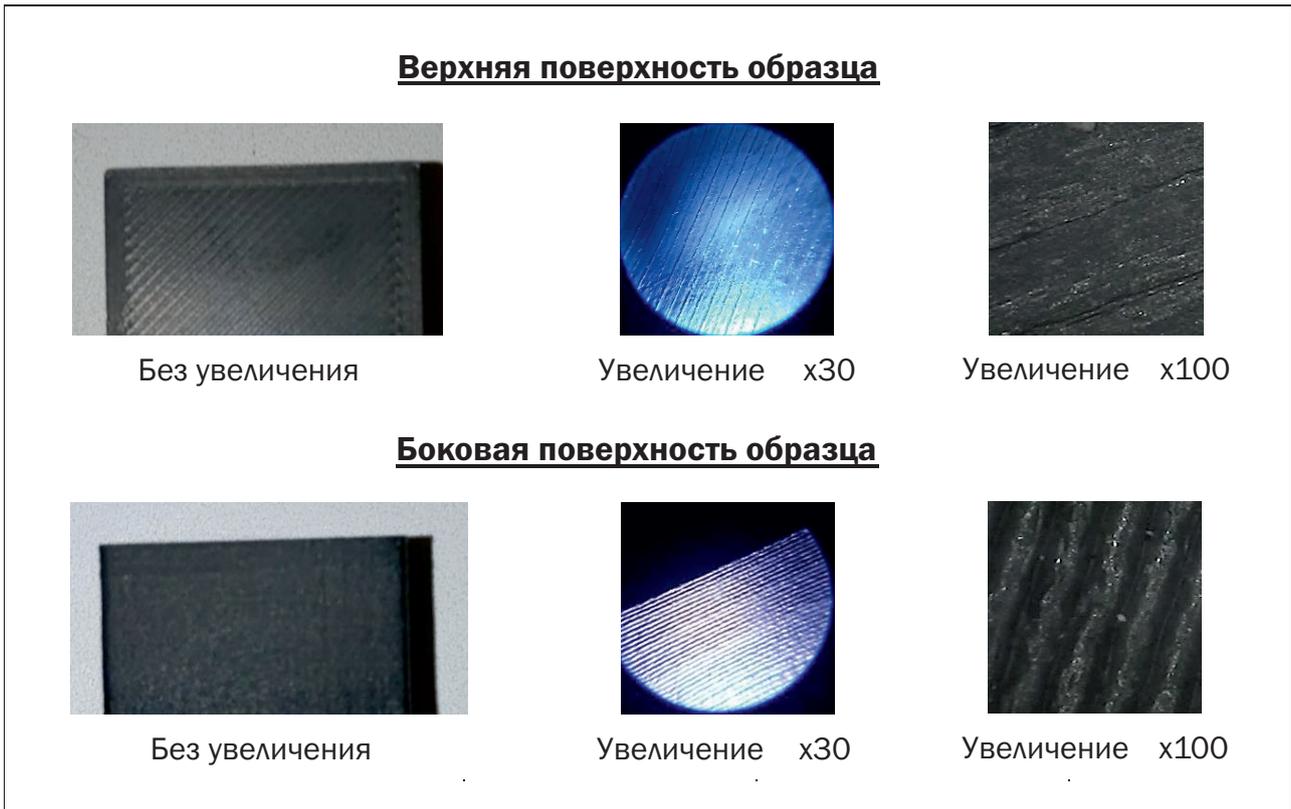


Рис. 8. Заготовка, обработанная ацетоном
Fig. 8. Acetone-treated workpiece



Рис. 9. Заготовка, обработанная дихлорметаном
Fig. 9. Dichloromethane-treated workpiece

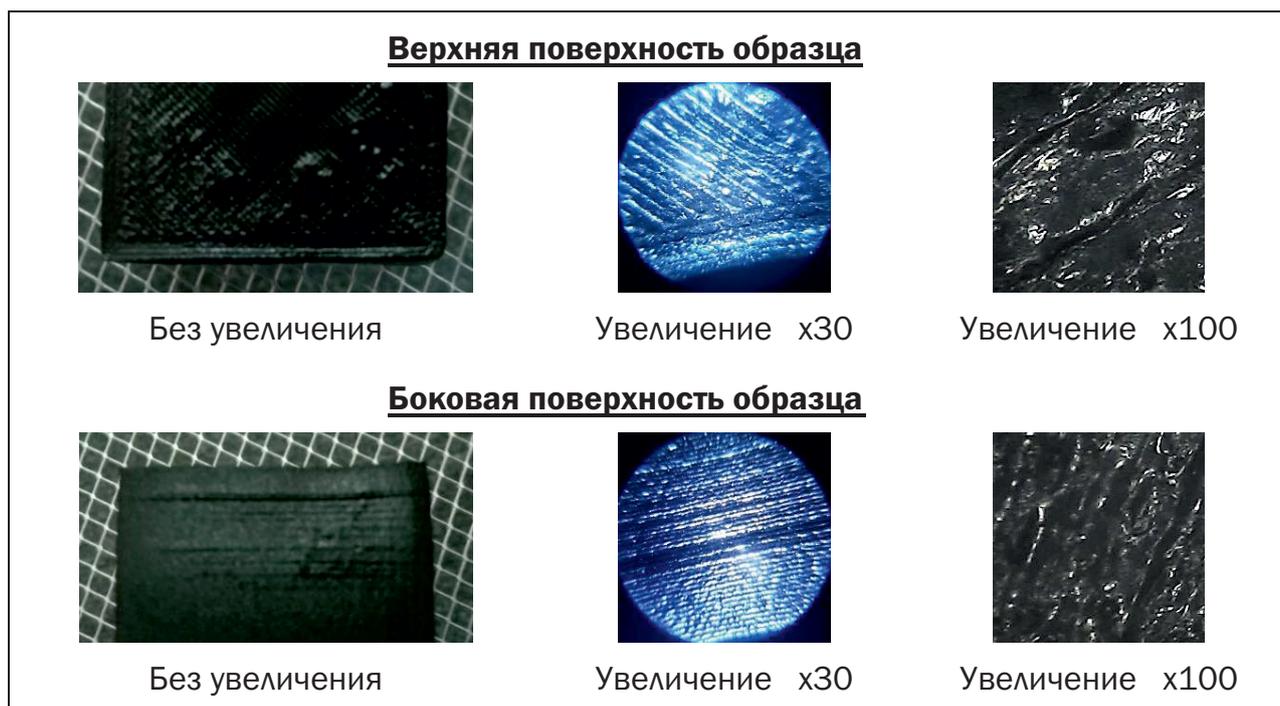


Рис. 10. Заготовка, обработанная термически
Fig. 10. Heat-treated workpiece

ного излучения. Была выбрана область 16×16 мм, на ней проводилась серия экспериментов. Проводился эксперимент с изменением мощности лазерного излучения (рис. 11). Выбран диапазон 60–80 Вт с шагом в 5 Вт.

В ходе эксперимента было выявлено, что изменение мощности лазера оказывает незначительное влияние на поверхность. Глубина снятого слоя во всех вариантах в пределах одной величины с незначительными отклонениями, поэтому была выбрана максимальная мощность в 80 Вт.

Следующий эксперимент заключался в изменении скорости прохода лазера с по-

стоянной мощностью в 80 Вт (рис. 12). Диапазон скорости прохода лазера был выбран 6–10 мс с шагом в 1 мс.

Эксперимент показал, что скорость прохода лазера влияет на глубину снимаемого слоя, начиная от времени воздействия 8 мс на точку, что соответствует скорости около 9 мм/с; величина углубления увеличивается значительно и составляет примерно 0,2 мм. Проходы со временем воздействия 6 и 7 мс на точку (примерно 12,5 и 11 мм/с, соответственно) не отличаются, величина снятого слоя составляет примерно 0,1 мм. В итоге было выбрано время воздействия 7 мс на

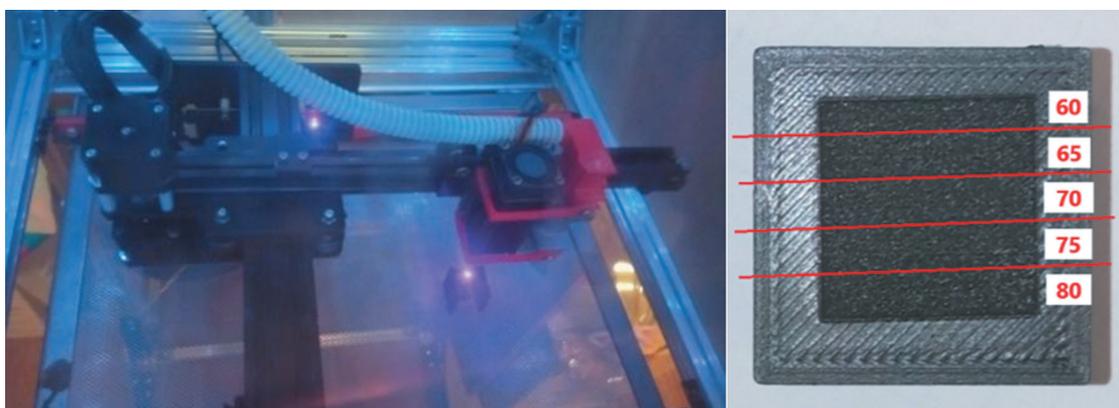


Рис. 11. Эксперимент с изменением мощности лазерного излучения
Fig. 11. Experiment with laser power variation



Рис. 12. Эксперимент с изменением скорости прохода лазера
Fig. 12. Experiment with laser pass velocity variation

точку, так как визуально это показало лучший результат.

После проведения экспериментов была произведена обработка поверхностей заготовки с мощностью лазера в 80% от максимальной (2800 мВт) и временем воздействия лазера в 7 мс на точку. Полученные поверхности представлены на рис. 13.

Обработанные лазерным излучением поверхности однородны, без четко выраженной слоистости.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанного сравнительного анализа методов обработки поверхностей изделий из ABS была проведена визуальная оценка по следующим критериям:

- тип поверхности;
- четкость слоев;
- однородность поверхности;
- степень деформации;
- наличие царапин/трещин;
- наличие раковин;



Рис. 13. Заготовка, обработанная лазерным излучением
Fig. 13. Laser treated workpiece

Таблица 2. Оценка методов обработки поверхностей
Table 2. Evaluation of surface treatment methods

Метод обработки	Критерии визуальной оценки							
	Тип поверхности	Четкость слоев	Однородность поверхности	Деформация	Царапины и трещины	Раковины	Наплывы	Пузырения
Без обработки	полуматовая	выс.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.
Обработка абразивным кругом крупной зернистости	матовая	низ.	сред.	сред.	выс.	низ.	низ.	низ.
Обработка абразивным кругом мелкой зернистости	матовая	низ.	выс.	сред.	сред.	низ.	низ.	низ.
Обработка полировальным кругом	матовая	низ.	сред.	сред.	низ.	выс.	сред.	низ.
Обработка полировальным кругом с абразивной пастой	матовая	низ.	сред.	сред.	низ.	выс.	сред.	низ.
Обработка ацетоном	матовая	выс.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.
Обработка дихлорметаном	матовая	сред.	выс.	сред.	низ.	низ.	низ.	сред.
Термическая обработка	глянец	выс.	сред.	выс.	выс.	низ.	низ.	выс.
Лазерная обработка	матовая	низ.	выс.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.

- наличие наплывов;
- наличие вздутий.

Оценка методов по вышеописанным критериям представлена в табл. 2.

Используя предложенную таблицу, есть возможность провести сравнительную оценку методов, итоги которой приведены ниже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно отметить по визуальной оценке, что все методы имеют свои положительные

и отрицательные стороны. Самый лучший результат показала обработка поверхности при помощи лазерного излучения, но основной минус метода заключается в предварительной настройке лазера и потенциальной сложности обработки объемных деталей. Наряду с этим для рассмотренных методов имеет место их использования в комбинации, что позволит нивелировать ряд недостатков.

Список источников

1. Ouazzani K., Jai M.E., Akhrif I., Radouani M., Fahime B.E. An experimental study of FDM parameter effects on ABS surface quality: roughness analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 127. P. 151–178. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11435-9>. EDN: MJUJUL.
2. Mathew A., Kishore S.R., Tomy A.T., Sugavaneswaran M., Scholz S.G., Elkaseer A., Wilson V.H., Rajan A.J. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts // Progress in Additive Manufacturing. 2023. Vol. 8. P. 1161–1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>. EDN: ASYRUS.
3. Yuan Chai, Rachel W. Li, Diana M. Perriman, Song Chen, Qing-Hua Qin, Paul N. Smith. Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 4295–4302. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1901-5>. EDN: YHUSYH.
4. Levin D., Kuzovkin A. Laser polishing as method of improving surface quality of fused deposition modeling (FDM) parts made by metal-filled plastic // Антропоцентрические науки в образовании: вызовы, трансформации, ресурсы: сб. науч. ст. Междунар. форума профессионального образования (г. Воронеж, 9–10 апреля 2024 г.). Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. P. 350–353. EDN: LXPTJB.
5. Кэнесс Э., Фонда К., Дзеннаро М. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития / пер. с итал. Триест: Международный центр теоретической физики Абдуса Салама, 2013. 192 с.
6. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 34. P. 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.

7. Запольский И.С., Левин Д.Ю., Рябина О.А. Анализ проблем, возникающих при эксплуатации настольных 3D-принтеров с открытым типом конструкции // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения «АПИР-28»: сб. науч. тр. Национальной науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Тула, 13–15 ноября 2023 г.). Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 249–252. EDN: FKOCZF.
8. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials // Procedia CIRP. 2022. Vol. 107. P. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.
9. Сивова А.Н., Паня А., Душечкина Е.А. Производство пластика для 3D печати из вторичных ПЭТ, ABS и PLA // Студенческая научная весна: сборник тезисов докладов Всерос. студ. конф. (г. Москва, 1–30 апреля 2021 г.). М.: Научная библиотека, 2021. С. 27–28. EDN: GKNTNA.
10. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 24. P. 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
11. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 21. P. 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.
12. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling // Sensors International. 2022. Vol. 3. P. 100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.
13. Потапов А.А., Говоров И.С., Гнидина И.В., Малахо А.П. Влияние технологических режимов FDM-печати и методов постобработки на физико-механические свойства образцов из ABS пластика // Новые полимерные композиционные материалы: матер. XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Нальчик, 4–10 июля 2024 г.). Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2024. С. 92. EDN: BVVD0V.
14. Рябина О.А., Левин Д.Ю., Свиридов Д.А., Алешина А.Э. Проблемы, возникающие в процессе литья по выплавленному моделям с применением 3D печати методом FDM // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. II Всерос. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 11–12 апреля 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 304–308. EDN: NNOYIB.
15. Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 477–487. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.
16. Joch R., Šajgalík M., Drbúl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process // Materials. 2023. Vol. 16. Iss. 10. P. 3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.
17. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties // Polymer Testing. 2022. Vol. 113. P. 107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2022.107654>.
18. Редькин Д.С., Левин Д.Ю., Рябина О.А. Проблемы использования третьей координаты в лазерно-гравировальных станках // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2024. Т. 1. С. 303–307. EDN: VKHXXE.
19. Левин Д.Ю., Рябина О.А., Кузовкин А.В. Оптимизация и унификация в процессе проектирования и производства универсального корпуса для лазерного гравера // Технологии и техника: пути инновационного развития: сб. науч. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 14 июня 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 303–308. EDN: PZBZOK.
20. Ryabinina O.A., Boldyrev A.I. Digital twins of machining facilities application at mechanical industry // Антропоцентрические науки в образовании: вызовы, трансформации, ресурсы: сб. тр. конф. (г. Воронеж, 9–10 апреля 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 373–375. EDN: JKZDSU.

References

1. Ouazzani K., Jai M.E., Akhrif I., Radouani M., Fahime B.E. An experimental study of FDM parameter effects on ABS surface quality: roughness analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;127:151-178. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11435-9>. EDN: MJUJUL.
2. Mathew A., Kishore S.R., Tomy A.T., Sugavaneswaran M., Scholz S.G., Elkaseer A., Wilson V.H., Rajan A.J. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023;8:1161-1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>. EDN: ASYRUS.
3. Yuan Chai, Rachel W. Li, Diana M. Perriman, Song Chen, Qing-Hua Qin, Paul N. Smith. Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96:4295-4302. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1901-5>. EDN: YHUSYH.
4. Levin D., Kuzovkin A. Laser polishing as method of improving surface quality of fused deposition modeling (FDM) parts made by metal-filled plastic. In: *Antropocentricheskie nauki v obrazovanii: vyzovy, transformacii, resursy: sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnogo foruma professional'nogo obrazovaniya = Anthropocentric sciences in education: challenges, transformations, resources: Collected scientific articles of the International forum of*

professional education. 9–10 April 2024, Voronezh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2024, p. 350-353. EDN: LXPTJB.

5. Keness E., Fonda K., Dzennaro M. Low cost 3D printing for science, education and sustainable development. Trieste: The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics; 2013, 192 p. (Russ. ed.: *Dostupnaya 3D pechat' dlya nauki, obrazovaniya i ustojchivogo razvitiya*).

6. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads. *Procedia Structural Integrity*. 2021;34:59-64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.

7. Zapol'skij I.S., Levin D.Yu., Ryabinina O.A. Analysis of problems arising during operation of desktop 3D printers with an open type of design. In: *Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Avtomatizaciya: problemy, idei, resheniya «APIR-28»: sbornik nauchnyh trudov Nacional'noj nauchno-tekhnichejskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Bulletin of Tula State University. Automation: problems, ideas, solutions «APIR-28» Collected scientific works of the National scientific and technical conference with international participation 13–15 November 2023*, Tula. Tula: Tula State University; 2023, p. 249-252. (In Russ.). EDN: FKOCZF.

8. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*. 2022;107:15-20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.

9. Sivova A.N., Panya A., Dushechkina E.A. Production of plastic for 3D printing from recycled PET, ABS and PLA. In: *Studencheskaya nauchnaya vesna: sbornik tezisov dokladov Vserossijskoj studencheskoj konferencii = Student Scientific Spring: collection of abstracts of reports of the All-Russian Student Conference*. 1–30 April 2021, Moscow. Moscow: Nauchnaya biblioteka; 2021, p. 27-28. (In Russ.). EDN: GKNTNA.

10. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*. 2019;24:289-295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.

11. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;21:884-892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.

12. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling. *Sensors International*. 2022;3:100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.

13. Potapov A.A., Govorov I.S., Gnidina I.V., Malakho A.P. Influence of FDM printing technological modes and post-processing methods on the physical and mechanical properties of ABS plastic samples. In: *Novye polimernye kompozicionnye materialy: materialy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = New polymer composite materials: Proceedings of the 20th International scientific and practical conference*. 4–10 July 2024, Na'chik. Na'chik: Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 2024, p. 92. (In Russ.). EDN: BYVDOV.

14. Ryabinina O.A., Levin D.Yu., Sviridov D.A., Aleshina A.E. Problems arising in the process of casting by the lost-wax process with 3D printing using the FDM method. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii: sbornik nauchnyh statej II Vserossijskoj nauchno-tekhnichejskoj konferencii = Development prospects of the processing technology and equipment in mechanical engineering: Collected scientific articles of the 2nd All-Russian scientific and technical conference*. 11–12 April 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 304-308. (In Russ.). EDN: NNOYIB.

15. Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E.A. Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):477-487. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.

16. Joch R., Šajgalík M., Drbúl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process. *Materials*. 2023;16(10):3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.

17. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*. 2022;113:107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.

18. Redkin D.S., Levin D.Yu., Ryabinina O.A. Problems of using the third coordinate in laser engraving machines. *Innovacionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika*. 2024;1:303-307. (In Russ.). EDN: VKHXXE.

19. Levin D.Yu., Ryabinina O.A., Kuzovkin A.V. Optimization and unification in the process of design and fabrication of universal housing for laser engraver. In: *Tekhnologii i tekhnika: puti innovacionnogo razvitiya: sbornik nauchnyh statej II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnichejskoj konferencii = Technologies and equipment: innovative development trends: collected scientific articles of the 2nd international scientific and technical conference*. 14 June 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 303-308. (In Russ.). EDN: PZBZOK.

20. Ryabinina O.A., Boldyrev A.I. Digital twins of machining facilities application at mechanical industry. In: *Antropocentricheskie nauki v obrazovanii: vyzovy, transformacii, resursy: sbornik trudov konferencii = Anthropocentric sciences in education: challenges, transformations, resources: collected papers of the conference*. 9–10 April 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 373–375. EDN: JKZDSU.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Дмитрий Юрьевич,
старший преподаватель,
кафедра графики, конструирования
и информационных технологий
в промышленном дизайне,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
✉ levin_du@cst-eg.ru

Подшибякин Максим Евгеньевич,
магистрант,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
yashirosh.kun@gmail.com

Рябина Ольга Алексеевна,
аспирант,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
ryabinina_olya@mail.ru

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
aiboldyrev@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Болдырев Александр Иванович является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 15.07.2025 г.; принята к публикации 30.07.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii Yu. Levin,
Senior Lecturer,
Department of Graphics, Design and
Information Technologies in Industrial Design,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
✉ levin_du@cst-eg.ru

Maksim E. Podshibyakin,
Master's Degree Student,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
yashirosh.kun@gmail.com

Olga A. Riabinina,
Postgraduate Student,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
ryabinina_olya@mail.ru

Aleksander I. Boldyrev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
aiboldyrev@mail.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Aleksander I. Boldyrev has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.06.2025; approved after reviewing 15.07.2025; accepted for publication 30.07.2025.