

УДК 621.923.9

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-16-23

Снижение шероховатости поверхностей аддитивных изделий электрохимическими методами обработки

А.С. Смирнов, А.Л. Галиновский, Д.А. Мартысюк

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Reducing Additive Product Surface Roughness by Electrochemical Processing Methods

A.S. Smirnov, A.L. Galinovsky, D.A. Martysyuk

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена проблема повышения качества поверхности изделий, полученных методом селективного лазерного плавления. Изложены возможности применения для этих целей метода электрохимического и электролитно-плазменного полирования. Приведены схема и описание экспериментальной установки, а также данные о технологических параметрах обработки, позволяющих эффективно реализовывать методы электрохимического и электролитно-плазменного полирования. Проанализированы экспериментальные данные, полученные при обработке аддитивных деталей, в частности профилограммы неровностей поверхности и показателей шероховатости, таких как класс шероховатости и среднеарифметическое отклонение профиля неровностей. Выдвинуты предложения по применению этих методов обработки на практике. Рассмотрены перспективные направления развития предложенных методов обработки аддитивных деталей, прежде всего, сложной формы.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электрохимическое полирование, электролитно-плазменное полирование, AlSi10Mg, шероховатость поверхностей, класс шероховатости

The article considers the problem of improving the quality of the product surfaces obtained by selective laser melting. The possibilities of applying the method of electrochemical and electrolytic-plasma polishing for these purposes are described. The scheme and description of the experimental setup are given, as well as data on the technological parameters of processing, allowing efficient implementing the methods of electrochemical and electrolytic-plasma polishing. The experimental data obtained during processing additive parts, in particular, the profilograms of surface irregularities and roughness indicators, such as the roughness class and the arithmetic mean deviation of the irregularity profile, are analyzed. Proposals for the application of these processing methods in practice are put forward. Perspective directions for the development of the proposed methods for processing additive parts, primarily of complex shape, are considered.

Keywords: additive technologies, electrochemical polishing, electrolyte-plasma polishing, AlSi10Mg, surface roughness, roughness class

Аддитивные технологии, основанные на методе послойного наращивания, имеют большую популярность в наукоемких отраслях. Технология

селективного лазерного плавления (SLM — Selective Laser Melting) [1, 2] позволяет создавать изделия разной конфигурации практически из

любых металлов и их сплавов, а современное SLM-оборудование (3D-принтеры) обладает высокой степенью автоматизации, точности и безопасности.

Несмотря на множество достоинств, эта технология не получила широкого применения в производстве, так как обладает рядом недостатков, одним из которых является низкий класс шероховатости поверхностей [3–6], не позволяющий использовать изделия без пост-обработки.

Следствием этого является потребность в подборе эффективных методов обеспечения заданного качества поверхности изделия по технологическим и экономическим показателям.

Для снижения шероховатости поверхностей деталей, как правило, используют механическую обработку (токарную, фрезерную, сверлильную и др.), которая не всегда применима из-за сложной геометрии получаемого изделия. Также она является экономически нецелесообразной, поскольку при проектировании детали необходимо закладывать достаточно большой припуск.

Перспективной альтернативой механической обработке в решении этих задач могут выступить методы электрохимического полирования (ЭХП) и электролитно-плазменного полирования (ЭПП). Эти методы лишены перечисленных недостатков, так как удаление неровностей может происходить на любой геометрически сложной поверхности, контактирующей с электролитом. Оба метода снижения шероховатости достаточно схожи, однако физические процессы, благодаря которым происходит удаление микронеровностей поверхности, сильно различаются.

Задача оценки результативности использования этих методов является актуальной в настоящее время, так как объемы производства деталей, полученных аддитивными методами, увеличиваются.

Цель работы — оценка эффективности применения методов ЭПП и ЭХП путем определения изменения шероховатости поверхностей образцов из сплава AlSi10Mg, полученных методом селективного лазерного сплавления, а также сравнение эффективности ЭПП и ЭХП.

Как отмечалось ранее, рассматриваемые методы достаточно схожи, однако физические процессы, благодаря которым происходит удаление неровностей, сильно различаются. ЭХП основано на анодном растворении не-

ровностей электропроводящего изделия в электролите (рис. 1, а) [7, 8], ЭПП — на электроэрозионном удалении неровностей электрическим разрядом, возникающим в образованной на поверхности изделия парогазовой оболочке (рис. 1, б) [9].

Несмотря на кажущуюся универсальность, электрохимические методы обработки не всегда эффективны. Снижение шероховатости происходит только в случае достаточной разницы напряженностей электрического поля на поверхности между соседними неровностями. Вследствие этого скорость удаления материала (скорость анодного растворения при ЭХП и скорость электроэрозии при ЭПП) на поверхности вершин выше, чем на поверхности впадин [10].

По этой причине необходимо убедиться в том, что использование ЭХП и ЭПП эффектив-

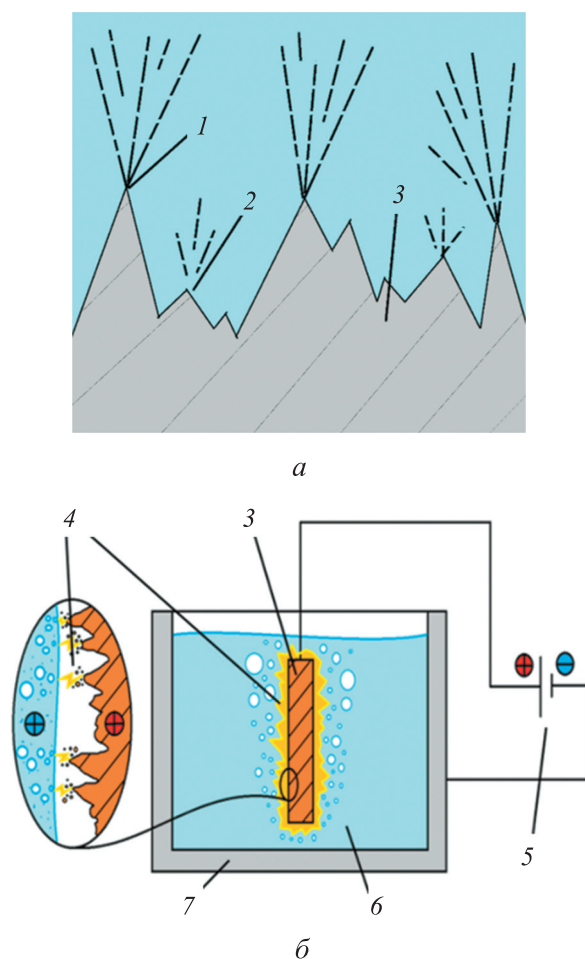


Рис. 1. Схемы удаления неровностей при ЭХП (а) и ЭПП (б):

- 1 и 2 — зона более и менее активного съема металла;
3 — обрабатываемое изделие; 4 — парогазовая оболочка;
5 — источник питания; 6 — электролит;
7 — токопроводящая ванна

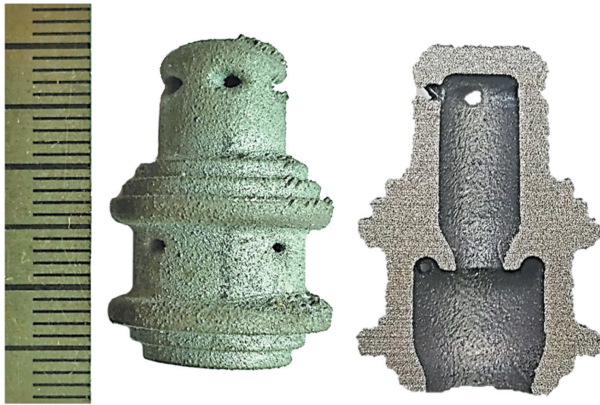


Рис. 2. Внешний вид экспериментального аддитивного образца из сплава AlSi10Mg

но для снижения шероховатости аддитивных изделий, имеющих структуру неровностей, отличную от механически обработанных деталей.

Эффективность методов ЭХП и ЭПП можно оценить путем сравнения шероховатости поверхности образца до и после обработки [11, 12]. С этой целью были изготовлены две партии

образцов по десять штук для каждого метода обработки.

Образцы представляли собой напечатанные на SLM-принтере центробежные форсунки из сплава AlSi10Mg (рис. 2). Такая конфигурация является одной из оптимальных, так как при большом радиусе кривизны (который необходим для более корректного снятия профиля неровностей) объем затраченного для создания образца материала минимален.

Исходя из известных по литературным источникам рекомендаций для ЭХП и ЭПП алюминиевых сплавов [13, 14], выбраны оптимальные технологические параметры (см. таблицу).

Для реализации и поддержания указанных условий обработки создана экспериментальная установка, принципиальная схема, которой показана на рис. 3.

Основным элементом установки является блок электропитания (рис. 4), обеспечивающий регулировку напряжения U и силы постоянного тока на электродах.

Оптимальные технологические параметры ЭХП и ЭПП для алюминиевых сплавов

Метод	Состав электролита (массовая доля, %)	Температура электролита, °С	Время обработки, мин	Анодная плотность тока, А/см ²	Напряжение, В
ЭХП	H ₃ PO ₄ (40), H ₂ SO ₄ (40), CrO ₃ (6), H ₂ O (14)	65...75	5	0,40	18
ЭПП	KCl (4), C ₂ H ₂ O ₂ (2), H ₂ O (94)	70...80	2	0,25	250

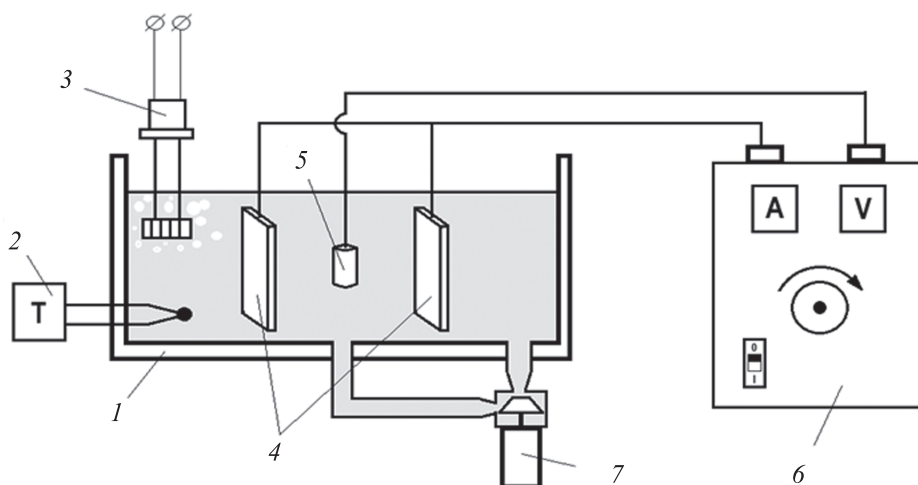


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения эффективности методов ЭХП и ЭПП:

- 1 — ванна; 2 — датчик температуры; 3 — нагревательный элемент; 4 — катоды; 5 — обрабатываемая деталь; 6 — блок электропитания; 7 — центробежный насос для циркуляции электролита

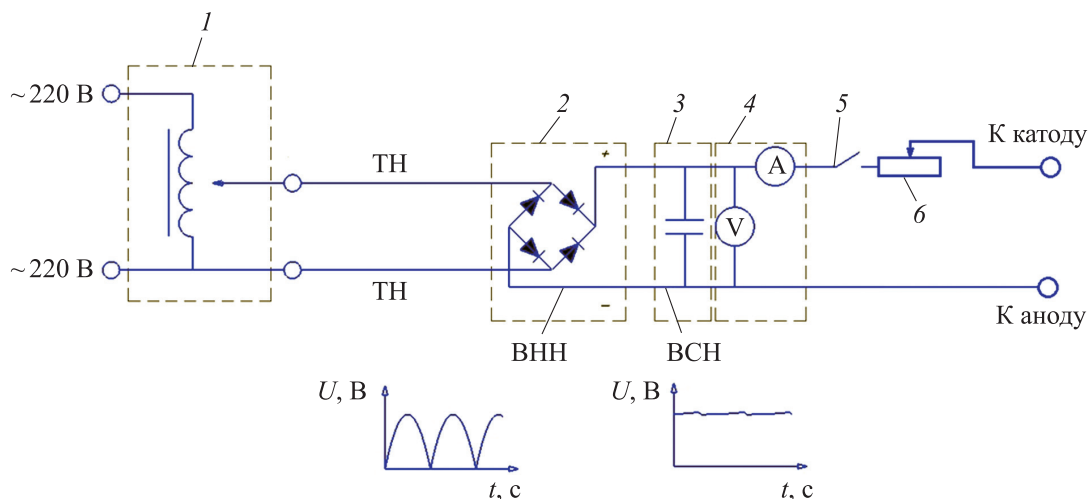


Рис. 4. Электрическая схема блока электропитания экспериментальной установки для изучения эффективности методов ЭХП и ЭПП:
 1 — лабораторный трансформатор; 2 — диодный мост; 3 — конденсатор; 4 — вольтамперметр; 5 — выключатель; 6 — реостат; ТН — трансформированное напряжение; ВНН и ВСН — выпрямленное несглаженное и сглаженное напряжение

В результате экспериментов получены две группы образцов. Первая выполнена методами ЭХП, вторая — ЭПП. Каждый образец подвергали профилометрии [15–18], получая с помощью профилометра-профилографа (производства АО «НИИИзмерения») значения шероховатости внешних поверхностей рассматриваемых образцов (см. рис. 2). На рис. 5, а–в показаны профили неровностей трех изделий — необработанного и подвергнутых ЭХП и ЭПП.

Значения шероховатости образцов внутри каждой группы различались не более чем на 5 %, что позволяет судить о повторяемости эксперимента, достигнутой соблюдением всех параметров обработки и отсутствием неучтенных переменных факторов.

Среднеарифметическое отклонение профиля неровностей Ra после ЭПП составляет 1,6 мкм, что соответствует шестому классу шероховатости, характерному для чистовой меха-

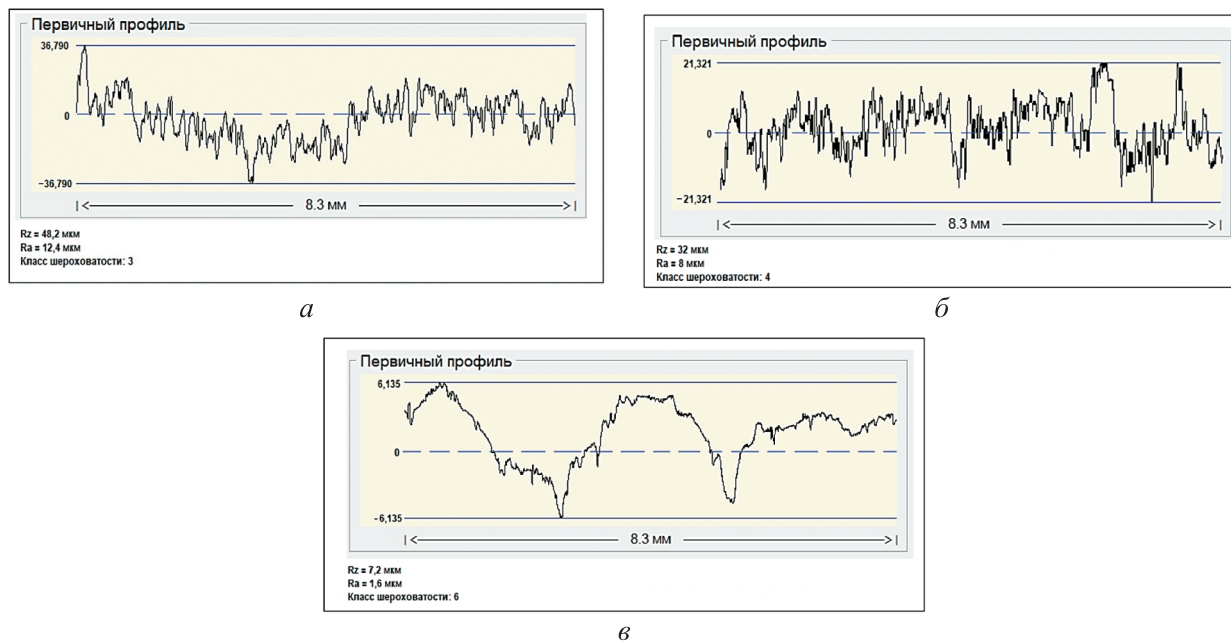


Рис. 5. Профили неровностей необработанного (а) и подвергнутых ЭХП (б) и ЭПП (в) изделий

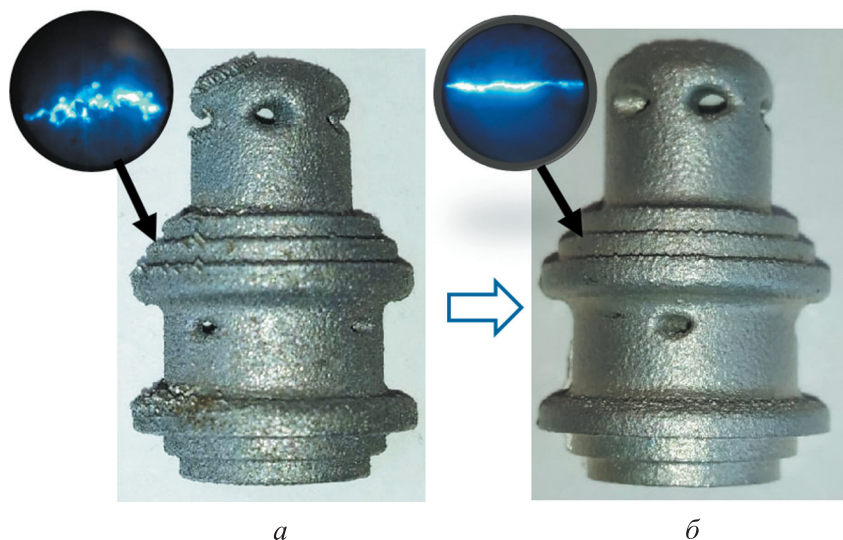


Рис. 6. Внешний вид образца до (а) и после (б) обработки методом ЭХП

нической обработки. С помощью ЭХП удалось лишь незначительно снизить шероховатость, с 12,4 до 8,0 мкм.

Несмотря на это, оба метода одинаково эффективно устраняют дефекты печати, связанные с наплавлением лишних частичек порошка (рис. 6).

Выводы

1. С помощью методов ЭХП и ЭПП удалось снизить шероховатость поверхности аддитивных деталей из сплава AlSi10Mg, созданных методом SLM-печати.

2. При сравнении результатов обработки образцов методами ЭХП и ЭПП установлено, что лучшей эффективностью, оцениваемой по получаемому классу шероховатости поверхности детали, обладает метод ЭПП.

3. Принимая во внимание меньшие энергозатраты метода ЭХП, его использование допускается для устранения дефектов печати, а также в тех случаях, когда к качеству поверхности не предъявлены существенные требования и когда начальный класс шероховатости не намного ниже, чем требуемый конструкторской документацией.

4. В будущих экспериментальных работах предполагается изучение эффективности электрохимических методов обработки на образцах других форм и размеров, изготовленных из других сплавов. Получение аналогичной информации о качестве формируемой поверхности для других материалов позволит сформировать информационно-аналитический комплекс данных в интересах инженеров-технологов, работающих в области изготовления деталей технологиями селективного лазерного сплавления, а также другими аддитивными методами.

5. При выполнении серии таких работ и расширении объемов формируемых данных в перспективе целесообразно создать базу данных, содержащих технологические режимы обработки, материалы и выходные показатели качества поверхности. Вероятно, такие данные будут востребованы машиностроительной отраслью ввиду растущих объемов применения аддитивных технологий, и что еще важнее, характерных для этих технологий сложных геометрических пространственных конфигураций создаваемых деталей, для которых применение механических методов обработки либо затруднено, либо технически невозможно или экономически неэффективно.

Литература

- [1] Шипицына Т.Н. Методы исследования показателей качества деталей, изготовленных по SLM-технологии. *Фундаментальная и прикладная наука: основные итоги 2017 г. Мат. III Ежегод. межд. науч. конф.* Санкт-Петербург, 2017, с. 56–59.

- [2] Абляз Т.Р., Муратов К.Р., Кочергин Е.Ю. и др. Электролитно-плазменное полирование поверхностей сложнопрофильных деталей, полученных методом SLM. *Вестник ПНИПУ. Сер. Машиностроение, материаловедение*, 2018, № 2, с. 86–92, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2018.2.10>
- [3] Гирфанова А.Г. Немеханизированные способы снижения шероховатости поверхности деталей, полученных аддитивными технологиями. *ИМТОМ-2018*. Казань, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2018, с. 307–310.
- [4] Longhitano G.A., Larosa M.A., Munhoza A.L.J. et al. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Mater. Res.*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 838–842, doi: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.014415>
- [5] Белов П.С. Влияние параметров постобработки на шероховатость поверхности изделий, получаемых методами аддитивных технологий. *Вестник МГТУ СТАНКИН*, 2019, № 1, с. 57–61.
- [6] Гузнов Н.А. Исследование шероховатости деталей, изготовленных методом селективного лазерного спекания. *Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки*. Москва, МАИ, 2021, с. 109–114.
- [7] Никифоров А.А., Демин С.А., Хмелева К.М. Электрохимическая обработка деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления. *Труды ВИАМ*, 2021, № 7, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12>
- [8] Таминдаров Д.Р., Плотников Н.В., Смыслов А.М. Электролитно-плазменное полирование лопаток компрессора из титановых сплавов. *Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева*, 2017, № 1, с. 141–145.
- [9] Kaputkin D.E., Duradji V.N., Kaputkina N.A. Plasma electrolytic processing of bimetals at the anodic process. *Lett. Mater.*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 433–437, doi: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-433-437>
- [10] Duradji V.N., Kaputkin D.E., Duradji A.Y. Aluminum treatment in the electrolytic plasma during the anodic process. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 81–84, doi: <http://dx.doi.org/10.25103/jestr.103.11>
- [11] Галиновский А.Л., Кравченко И.Н., Мартысюк Д.А. и др. Разработка метода дискретной абразивно-жидкостной ультраструйной диагностики материалов. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2021, № 4, с. 88–99.
- [12] Захаров С.В., Коротких М.Т. Электролитно-плазменное полирование сложнопрофильных изделий из алюминиевого сплава Д16. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз — Антей»*, 2017, № 3, с. 83–87, doi: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-3-83-87>
- [13] Безъязычный В.Ф., Федосеев Д.В. Анализ параметров шероховатости поверхностей заготовок, полученных методом аддитивных технологий. *Научные технологии в машиностроении*, 2019, № 12, с. 3–11, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2019-2019-12-3-11>
- [14] Комбаев К.К., Квеглис Л.И. Электролитно-плазменное упрочнение поверхностных слоев алюминиевого сплава. *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии*, 2018, т. 11, № 4, с. 461–472, doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0069>
- [15] Benedyk J.C., ed. Additive manufacturing of aluminum alloys: augmenting or competing with traditional manufacturing? *Light Metal Age*, 2018, no. 1. URL: <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys/>
- [16] Сухов Д.И., Неруш С.В., Беляков С.В. и др. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 9, с. 73–84, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-73-84>
- [17] Liu K., Sun H., Tan Y. et al. Additive manufacturing of traditional ceramic powder via selective laser sintering with cold isostatic pressing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 945–952, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9441-3>
- [18] Дедкова А.А., Киреев В.Ю., Махиборода М.А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщин слоев. *Наноструктуры. Математическая физика и моделирование*, 2020, т. 20, № 2, с. 23–40.

References

- [1] Shipitsyna T.N. [Methods for study on quality numbers of details made with SLM technology]. *Fundamental'naya i prikladnaya nauka: osnovnye itogi 2017 g. Mat. III Ezhegod. mezhd. nauch. konf.* [Fundamental and Applied Science: Main results of 2017. Proc. III Ann. Int. Sci. Conf.]. Sankt-Petersburg, 2017, pp. 56–59. (In Russ.).
- [2] Ablyaz T.R., Muratov K.R., Kochergin E.Yu. et al. Improving the quality of the surfaces of products obtained by electrical discharge machining using electrolytic-plasma polishing technology. *Vestnik PNIPU. Ser. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2018, no. 2, pp. 86–92, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2018.2.10> (in Russ.).
- [3] Girfanova A.G. [Nonmechanized methods for lowering surface roughness of parts made with additive technologies]. *IMTOM-2018* [Proc. INTOM-2018]. Kazan', KNITU-KAI im. A.N. Tupoleva Publ., 2018, pp. 307–310. (In Russ.).
- [4] Longhitano G.A., Larosa M.A., Munhoza A.L.J. et al. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Mater. Res.*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 838–842, doi: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.014415>
- [5] Belov P.S. Influence of post-processing parameters on the surface roughness of products obtained by additive technologies. *Vestnik MGTU STANKIN* [Vestnik MSTU STANKIN], 2019, no. 1, pp. 57–61. (In Russ.).
- [6] Guznov N.A. [Study on roughness of part made with selective laser sintering method]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki* [Students Scientific Community of XXII century. Technical Sciences]. Moscow, MAI Publ., 2021, pp. 109–114. (In Russ.).
- [7] Nikiforov A.A., Demin S.A., Khmeleva K.M. Electrochemical treatment of parts obtained by selective laser fusion. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2021, no. 7, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12> (in Russ.).
- [8] Tamindarov D.R., Plotnikov N.V., Smyslov A.M. Electrolytic plasma processing of compressor blades manufactured of titanium alloys. *Vestnik RGATU imeni P.A. Solov'yeva* [Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2017, no. 1, pp. 141–145. (In Russ.).
- [9] Kaputkin D.E., Duradji V.N., Kaputkina N.A. Plasma electrolytic processing of bimetals at the anodic process. *Lett. Mater.*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 433–437, doi: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-433-437>
- [10] Duradji V.N., Kaputkin D.E., Duradji A.Y. Aluminum treatment in the electrolytic plasma during the anodic process. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 81–84, doi: <http://dx.doi.org/10.25103/jestr.103.11>
- [11] Galinovskiy A.L., Kravchenko I.N., Martysyuk D.A. et al. Development of a method for discrete abrasive-liquid ultra-jet diagnostics of materials. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems], 2021, no. 4, pp. 88–99. (In Russ.).
- [12] Zakharov S.V., Korotkikh M.T. Electrolytic plasma processing of complex products from aluminum alloy D16. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz — Antey»* [Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation], 2017, no. 3, pp. 83–87, doi: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-3-83-87> (in Russ.).
- [13] Bez"yazychnyy V.F., Fedoseev D.V. Analysis of surface roughness parameters in billets obtained by method of additive technologies. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyeni* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 12, pp. 3–11, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2019-2019-12-3-11> (in Russ.).
- [14] Kombayev K.K., Kveglis L.I. Electrolyte-plasma strengthening of surface layers of aluminum alloy. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2018, vol. 11, no. 4, pp. 461–472, doi: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0069> (in Russ.).
- [15] Benedyk J.C., ed. Additive manufacturing of aluminum alloys: augmenting or competing with traditional manufacturing? *Light Metal Age*, 2018, no. 1. URL: <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/article-additive-manufacturing-of-aluminum-alloys/>

- [16] Sukhov D.I., Nerush S.V., Belyakov S.V. et al. The research of surface roughness parameters and accuracy of additive manufacturing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2017, no. 9, pp. 73–84, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-73-84> (in Russ.).
- [17] Liu K., Sun H., Tan Y. et al. Additive manufacturing of traditional ceramic powder via selective laser sintering with cold isostatic pressing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 945–952, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9441-3>
- [18] Dedkova A.A., Kireev V.Yu., Makhboroda M.A. Possibilities and limitations of the contact profilometry method for determining the height difference for monitoring topological elements and layer thickness. *Nanostruktury. Matematicheskaya fizika i modelirovaniye* [Nanostructures. Mathematical Physics & Modelling], 2020, vol. 20, no. 2, pp. 23–40. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 04.02.2022

Информация об авторах

СМИРНОВ Александр Сергеевич — инженер кафедры «Ракетные двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: smirnov6857@gmail.com).

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

МАРТЫСЮК Дмитрий Александрович — инженер кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: neidin1264@gmail.com).

Information about the authors

SMIRNOV Alexander Sergeevich — Engineer, Department of Rocket Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: smirnov6857@gmail.com).

GALINOWSKY Andrey Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Doctor of Science (Pedagogy), Professor, Head of the Department Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

MARTYSYUK Dmitry Alexandrovich — Engineer, Department of Aerospace Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: neidin1264@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Смирнов А.С., Галиновский А.Л., Мартысюк Д.А. Снижение шероховатости поверхностей аддитивных изделий электрохимическими методами обработки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 16–23, doi: [10.18698/0536-1044-2022-7-16-23](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-16-23)

Please cite this article in English as:

Smirnov A.S., Galinovsky A.L., Martysyuk D.A. Reducing Additive Product Surface Roughness by Electrochemical Processing Methods. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 16–23, doi: [10.18698/0536-1044-2022-7-16-23](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-16-23)