

К. Л. М. Диату¹, Д.Н. Иванов², С.Ю. Симонов³,
А.А. Москалец⁴, С.В. Беляков⁵, А.И. Попов⁶,

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ SLM- МАТЕРИАЛОВ



¹Клара Лелу Муанда Диату,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)999-236-58-69, E-mail: diatu.k@edu.spbstu.ru.



²Дмитрий Николаевич Иванов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)999-236-58-69, E-mail: ivanov5.dn@edu.spbstu.ru.



³Сергей Юрьевич Симонов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)999-236-58-69, E-mail: simonov_syu@spbstu.ru.



⁴Артем Анатольевич Москалец,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: moskalets_aa@spbstu.ru.



⁵Сергей Владимирович Беляков,
Московский государственный технический университет им. Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский университет),
Россия, Москва
Тел.: (812)552-9302, E-mail: gidravlik2013@yandex.ru.



⁶Александр Иннокентьевич Попов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: popov_ai@spbstu.ru .

Аннотация

В работе исследуется изменение морфологии поверхности материалов, полученных селективным лазерным плавлением в процессе струйной электролитно-плазменной обработки. Исследование проводилось для сплавов Инконель 718, ЭП648, AISI 316L, полученных SLM-технологией. Рассмотрена возможность размерной и финишной обработки данных материалов. Результаты исследований показывают, что наиболее значительные изменения параметра шероховатости Ra достигаются путем размерной обработки. Наибольшее влияние на скорость размерной обработки оказывает увеличение плотности тока на поверхности образца, объем пропускаемого электролита и его концентрация. Уменьшение параметра шероховатости Ra обработанной поверхности при финишной обработке происходит при увеличении температуры процесса, уменьшении скорости перемещения токоподвода, оптимизации геометрии электрод - инструментов и подбора электролита. Изучена морфология поверхности. Показано, что поверхность может иметь многочисленные дефекты связанные, с процессом получения заготовки. Проведено электростатическое моделирование процесса электролитно-плазменной обработки с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Рассмотрено влияние шероховатости поверхности разного уровня на величину напряженности электрического поля. Показано, что локализация напряженности электрического поля на вершинах макронеровностей благоприятно отражается при размерной обработке при удалении макрорельефа поверхности. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для струйной электролитно-плазменной обработки медицинских инструментов, турбинных лопаток и других изделий, полученных методом селективного лазерного плавления.

Ключевые слова: струя, электролит, плазма, LSM, морфология, поверхность, моделирование

Введение

Развитие инновационных методов получения заготовок приводит к созданию материалов и технологий с уникальными свойствами [1]. Одной из таких технологий является технология селективного лазерного плавления

(SLM). Высокая скорость получения заготовки, малый вес, возможность получения природоподобных форм, и форм недоступных другим технологическим методам, снижение затрат на производство уникальней химический состав и свойства делают данный вид обработки очень перспективным в самых различных областях технологического применения [2-4]. Однако не смотря на явные преимущества метода, одним из сложнейших вопросов является постобработка полученных изделий [5].

Она представляет из себя трудоемкую, часто не решаемую техническую задачу. Это объясняется, прежде всего тем, что детали имеют сложную геометрическую форму, неравномерную поверхность с остатками поддержек для печати изделия, и наличием сплавленных и выступающих над поверхностью частиц.

Кроме этого, усадка изделия после печати формирует сложный макрорельеф, состоящий из переменных выступов и впадин. Это образует бессистемную макрогеометрию поверхности, представляющую технологический припуск, подлежащий выравниванию и частичному удалению. При этом исходный параметр Ra поверхности может достигать значений 10-12 мкм и более. Удаление остатков элементов печати и исходная шероховатая поверхность требуют применения новых технологических решений для получения поверхности изделия. Среди применяемых сегодня технологических методов размерной обработки SLM изделий, использующихся для предварительной обработки, можно отнести удаление поддержек, пилами, отрезными машинками, лазером и откусыванием с использованием ручного слесарного инструмента. Получистовая обработка поверхности изделия также подразумевает зачистку электроинструментом, с абразивными лентами кругами, шарошками или применением пескоструйной обработки. В качестве финишной обработки используется обработка войлочными кругами, насадками, ремнями с абразивной пастой, электрохимическое полирование и нанесение защитных покрытий [6-7]. Исходя из этого для изготовления изделий полученных SLM -методом мы сталкиваемся с необходимостью применения нескольких технологических процессов использующих десятки инструментов. При этом выбор технологии всегда остается за технологическими возможностями и традициями производителя.

Очевидно, что наиболее предпочтительным является метод обработки, позволяющий в одной технологической операции выполнить весь цикл обработки. Таким способом, по нашему мнению, является технология струйной электролитно-плазменной обработки. Преимуществами данной технологии является низкая энергоемкость процесса, использование экологически чистых электролитов, низкий уровень испарений от зоны обработки, низкая температура процесса, технологическая возможность обработки изделия с разной кривизной поверхности, более высокая

точность по сравнению с обработкой в электролитической ванне, возможность проводить как размерную, так и финишную обработку [8-10].

Однако работ посвященных струйной постобработке материалов полученных, SLM- методом, не достаточно.

Поэтому целью нашей работы является выявление особенностей обработки материалов полученных SLM-методом струйной электролитно-плазменной обработкой. Для выполнения данной цели необходимо решить следующие задачи: оценить изменение морфологии поверхности в процессе обработки, оценить изменение параметра шероховатости от времени обработки, оценить влияние изменения формы в процессе обработки на напряженность электрического поля.

Материалы и оборудование

В качестве применяемого оборудования мы использовали экспериментальную установку, разработанную в Высшей школе машиностроения СПбПУ [7-10]. Данное оборудование представляет собой автоматизированное устройство для струйной электролитно-плазменной обработки криволинейных поверхностей. В качестве источника питания использовался трансформатор с выпрямителем постоянного тока, собранные по схеме Ларионова. Для размерной обработки поверхности использовали электролитическую струю. При формировании финишной обработки использовали диффузный объемный разряд. Принципиальные схемы формирования электролитно-плазменных разрядов для струйной обработки представлены на рис.1.

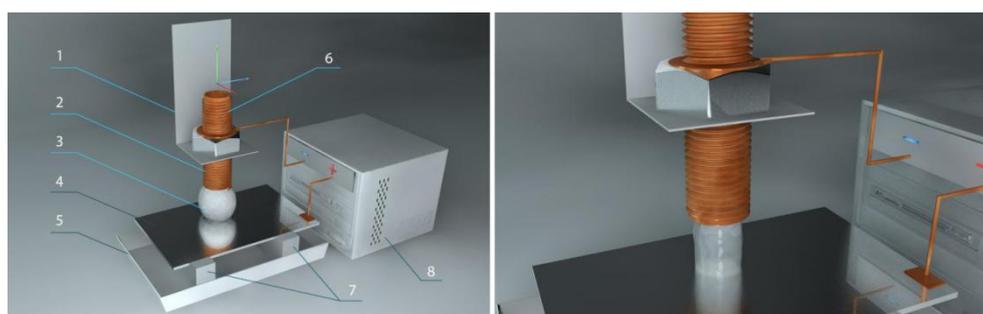


Рис. 1. Принципиальная схема формирования электролитно-плазменных разрядов ($Q = 2-300$ л/ч): а) – диффузный объемный разряд ($Q = 2-10$ л/ч): 1 - кронштейн, 2 – трубка полого катода, 3 – область электролитно-плазменного разряда, 4 - изделие, 5 – ванна приема электролита, 6 – трубка подачи электролита, 7 - изоляторы, 8 – блок питания постоянного тока; б) электролитическая струя ($Q = 10-300$ л/ч).

Исследование морфологии поверхности проводили на микроскопе МЕТАМ ЛВ31 (ЛОМО, Россия). Оценку размеров проводили методом

сравнения с калибровочными линейками. Микрофотографии получены съемкой на устройство Xiaomi Redmi 4x. Моделирование профиля шероховатости поверхности проводили с помощью Adobe Illustrator с дальнейшим импортированием DXF файла в программу COMSOL Multiphysics для проведения электростатического расчета. В качестве материалов для исследований были выбраны образцы размером 20*30*2 мм из материалов, полученных SLM-методом, из сплавов Инконель 718, ЭП 648 и AISI 316L. Для обработки поверхности образцов из материалов, полученных методом LSM нами, были применены технологические режимы обработки, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные эксперимента

Параметр	Значение	Размерность
Концентрация	5-40	г/л
Время обработки	660	с
Напряжение	20-500	В
Ток разряда	0.1-5	А
Минутная подача	180-500	мм/мин
Объемный расход электролита	2-40	л/ч

Результаты исследований

Динамика изменения параметра шероховатости Ra

Исследования проводились при обработке образцов 20*30*2 мм. Время одного прохода при подаче 500 мм/мин и шаге 0.1 мм составило 11 мин.

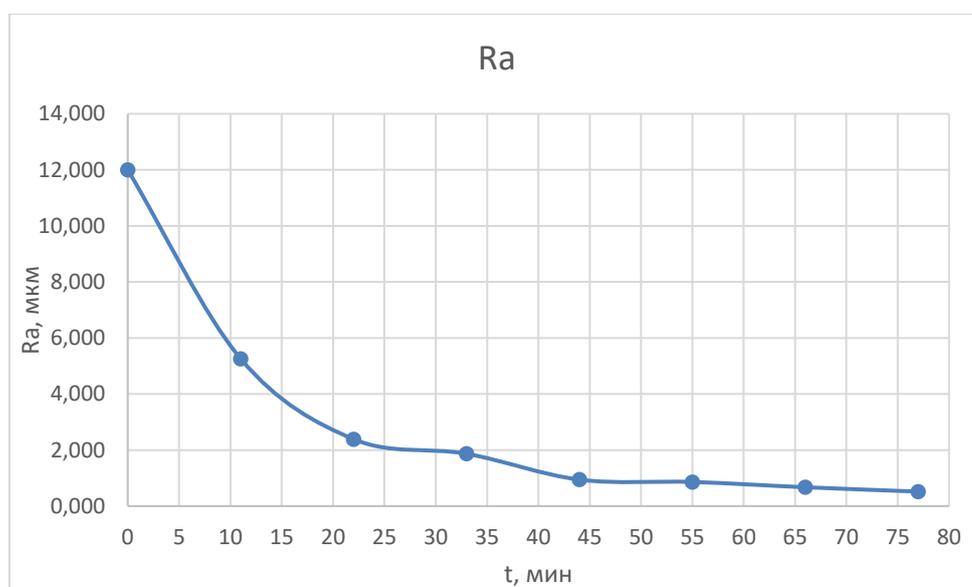
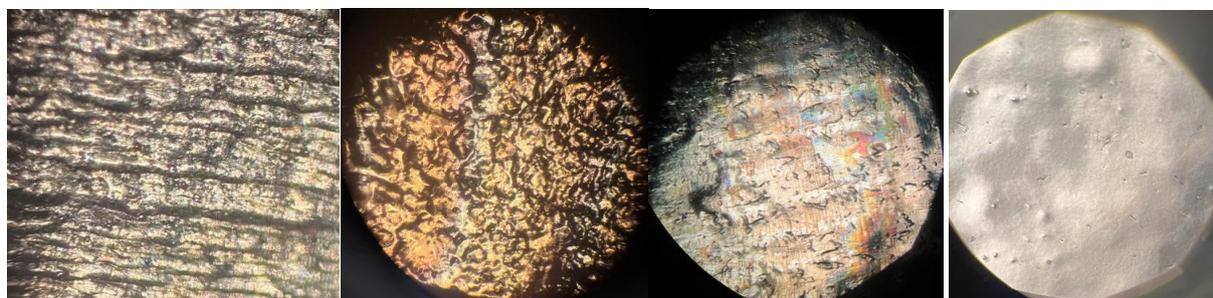


Рис. 2. Зависимость изменения параметра шероховатости Ra от времени обработки поверхности полым токоподводом ($\phi_{вн}= 3\text{мм}$, $h=4\text{мм}$).

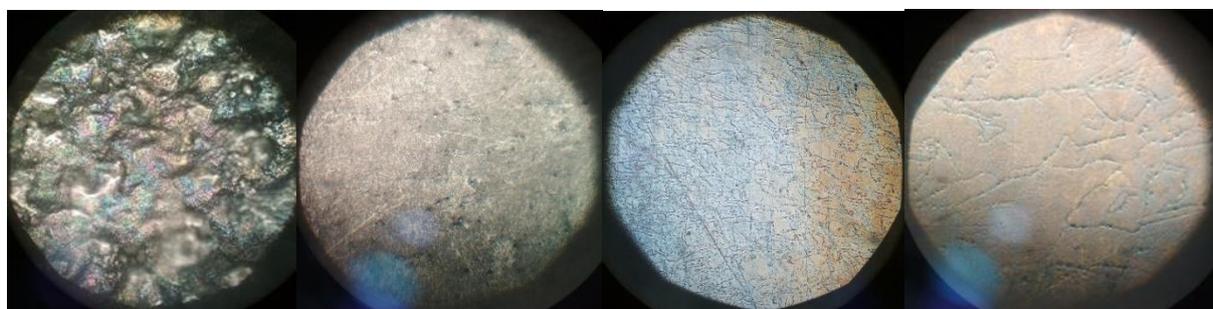
Изменение шероховатости поверхности в процессе размерной обработки образцов из сплава ЭП648 проводили после каждого прохода. Исследования изменения шероховатости показывают, что при исходном параметре Ra 12 мкм ее уменьшение идет по экспоненциальной зависимости. При этом значение величины шероховатости уменьшается двукратно после каждого прохода. Динамика изменения параметра шероховатости Ra от времени обработки поверхности полым токоподводом приведена на рис. 2.

Исследование морфологии поверхности в процессе обработки

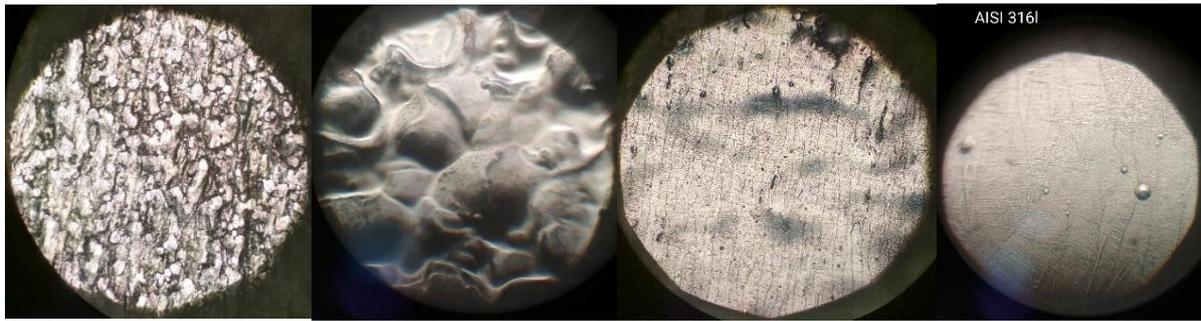
Исследование процесса изменения морфологии для трех разных материалов, полученных поверхности проводилось на металлографическом микроскопе METAM LB 31. На рис. 3 представлены микрофотографии исходной поверхности и результаты ее обработки через разные промежутки времени. Анализ морфологии показывает, что при комбинированной обработке поверхности материалов полученных SLM-методом есть общие закономерности, среди которых можно отметить развитый исходный рельеф поверхности, плавное изменение микропрофиля поверхности, наличие микродефектов, возможность выравнивания поверхности до параметра шероховатости Ra 0.1мкм.



a)



b)



в)

Рис. 3. Изменение морфологии поверхности материала, полученного технологией LSM, с исходной поверхности до полировки струйной электролитно-плазменной обработкой:
а) - материал Инконель718; б) - материал ЭП 648; в) - материал AISI 316L.

Анализ напряженности электрического поля на дефектах поверхности

Анализ напряженности электрического поля проводился в соответствии с уравнением:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} U) = -\rho \quad (1)$$

где U – потенциал электростатического поля; ε – диэлектрическая проницаемость; ρ – плотность объемных свободных зарядов.

Учитывая, что плотность объемного заряда равна:

$$\rho = 0 \quad (2)$$

Запишем потенциальную оценку с помощью векторного дифференциального оператора ∇ :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, \quad \mathbf{E} = -\nabla U, \quad (3)$$

где ∇ – векторный дифференциальный оператор набла; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля.

При использовании осесимметричной модели выражение (3) можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} \quad (4)$$

Расчет напряженности электрического поля показывает, что эта величина при напряжении $U = 300$ В, высоте межэлектродного промежутка $h = 3$ мм равна $E = 3,57 \cdot 10^5$ В/м, а при $U = 200$ В соответственно $E = 7,43 \cdot 10^5$ В/м. (рис. 4.).

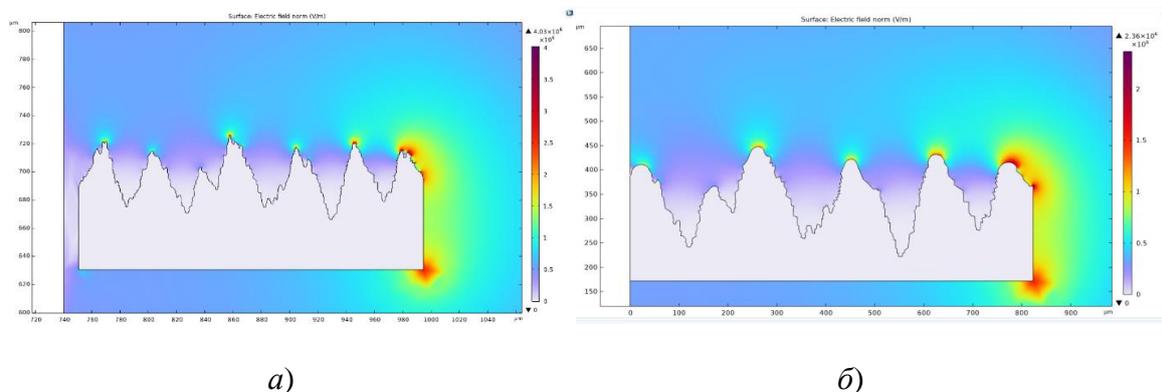


Рис. 4. Расчетная модель построения модели микропрофиля поверхности при электролитно-плазменном полировании в программе COMSOL Multiphysics *а)* исходная шероховатость поверхности; *б)* скругление вершин после электролитно-плазменной обработки.

Обсуждение

Результаты проведенных исследований показывают, что струйная электролитно-плазменная обработка позволяет реализовать комбинированную обработку изделий, полученных методом лазерного селективного сплавления в последовательности размерной и затем финишной обработки. Материалы Инконель 718 и ЭП648 и AISI 316L значительно отличаются по своим электрохимическим свойствам. При наличии сходной морфологии поверхности обработка материала для коррозионностойкого AISI 316L представляет определенную трудность, требующей большего времени обработки и значительно более сильных электролитов. Материал Инконель 718 достаточно легко растворяется при электрохимической обработке и хорошо полируется до Ra 0.1 мкм. Материал ЭП648 занимает промежуточное положение по скорости съема. Однако позволяет довести поверхность комбинированной обработкой до Ra 0.2-0.1 мкм. Анализ, проведенный в программе COMSOL Multiphysics, показывает локализацию напряженности электрического поля на вершинах макронеровностей. Это благоприятно отражается при размерной обработке при сглаживании макрорельефа поверхности. В целом можно говорить о том, что материалы полученные SLM- методом доступны для струйной электролитно-плазменной обработке. Однако при сложной криволинейной форме требуют специализированного оборудования.

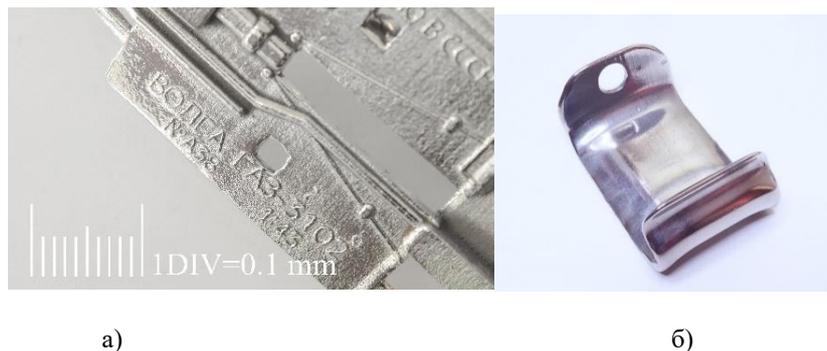


Рис. 5. Изделия, обработанные струйной электролитно-плазменной обработкой: а) - корпус автомобиля ГАЗ-3102, материал AISI 316L; б) — захват медицинского расширителя, материал Инконель 718.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Изделия, полученные технологией LSM, имеют многочисленные расположенные поверхностные дефекты, равномерное удаление которых, возможно, за счет комбинированной струйной электролитно-плазменной обработки.
2. При исходном параметре шероховатости Ra 12 мкм возможна размерная обработка изделий, полученных методом LSM струйной электролитно-плазменной обработкой с достижением параметра шероховатости Ra 0,4-0,2 мкм и финишная технологическая обработка с достижением Ra 0,1.
3. Электростатический расчет показывает преимущественное распределение электрического поля на вершинах макродефектов, что благоприятно сказывается при равномерном съеме вершин струйной размерной обработкой поверхности.

Благодарность

Авторы выражают благодарность графическому дизайнеру Диане Поповой за подготовку иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Попова, А. И. Методы и механизмы управления инновационным потенциалом научно-исследовательской организации : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям

- и сферам деятельности, в т.ч.: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда; экономика народонаселения и демография; экономика природопользования; экономика предпринимательства; маркетинг; менеджмент; ценообразование; экономическая безопасность; стандартизация и управление качеством продукции; землеустройство; рекреация и туризм)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Попова Алла Ивановна. – Санкт-Петербург, 2009. – 15 с. – EDN NKSOTF.
- [2] Исследование фазовых переходов при термической обработке нержавеющей стали РН1, полученной методом селективного лазерного плавления / А. С. Лещева, А. И. Горунов, А. Н. Мухаметов, А. А. Арсланов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2018 (МНТК "ИМТОМ-2018") : Материалы IX Международной научно-технической конференции, Казань, 05–07 декабря 2018 года. Том Часть 1. – Казань: Акционерное общество "Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий", 2018. – С. 89-92. – EDN ZBWYXB.
- [3] Химико-термическая обработка деталей, полученных селективным лазерным плавлением / О. В. Чудина, В. А. Зорин, А. А. Брежнев [и др.] // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 35-40. – EDN SIXQOU.
- [4] Цветкова, Е. В. Особенности структуры и свойств аустенитной стали 03X17H14M3 после селективного лазерного плавления и термической обработки / Е. В. Цветкова, К. О. Базалева // XIV международный семинар структурные основы модифицирования материалов МНТ-ХИВ: Тезисы докладов XIV международного семинара, Обнинск, 13–15 июня 2017 года. – Обнинск: Обнинский институт атомной энергетики - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2017. – С. 76. – EDN YZEVXH.
- [5] Исследование подходов пост-обработки деталей, полученных методом селективного лазерного плавления / А. А. Вознесенская, Д. А. Кочуев, А. В. Киреев [и др.] // Современные проблемы физики и технологий: VIII-я Международная молодежная научная школа-конференция, Москва, 15–20 апреля 2019 года. Том Часть 1. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2019. – С. 195-196. – EDN YVJYDA.
- [6] Патент № 2716926 С1 Российская Федерация, МПК С22F 1/18, С22F 3/00, С23С 8/10. Способ комплексной упрочняющей обработки изделия из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного методом аддитивного

- производства: № 2019134357: заявл. 28.10.2019: опублик. 17.03.2020 / А. В. Панин, С. В. Панин, С. А. Мартынов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). – EDN GIVJYX.
- [7] Quitzke, Susanne & Kröning, Oliver & Safranchik, Daniel & Zeidler, Henning & Danilov, Igor & Martin, André & Böttger-Hiller, Falko & Essel, Shai & Schubert, Andreas. (2022). Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*. 75. 1123-1133. 10.1016/j.jmapro.2022.01.064.
- [8] Электрофизические закономерности струйной электролитно - плазменной обработки / А. И. Попов, А. А. Москалец, С. В. Беляков [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. – 2023. – Т. 1, № 1(43). – С. 4-19. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-4-19. – EDN GHWUVC.
- [9] Lyubimov, V.V., Volgin, V.M., Krasilnikov, V.P. (2020). Investigation of Kinematic–Geometric Characteristics of Electrochemical Machining. In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_42
- [10] P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle, D. Ryabkov, *Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview*, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issue 21, 2007, Pages 8746-8760, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023>.
- [11] Кылышканов, М. К. Влияние режимов электролитно-плазменной закалки на структуру и свойства стали бурового долота / М. К. Кылышканов, К. К. Комбаев // Труды университета. – 2009. – № 2(35). – С. 16-18. – EDN QZLZJN.
- [12] Попов, А. И. Гидродинамические особенности струйного электролитно-плазменного разряда / А. И. Попов // *Технология машиностроения*. – 2023. – № 6. – С. 5-17. – EDN FWIRAM.
- [13] Попов, А. И. Анализ морфологии при воздействии электролитической струи на поверхность нержавеющей стали / А. И. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2023. – Т. 4, № 4(46). – С. 35-48. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-35-48. – EDN ICUPCZ.
- [14] Попов, А. И. Атомно-дислокационная модель удаления поверхностных слоев струйным электролитно-плазменным полированием / А. И. Попов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 1, № 1(47). – С. 31-51. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-31-51. – EDN DWAPMM.

K.L.M. Diatu¹, D.N. Ivanov¹, S.Yu. Simonov¹,
A.A. Moskalets¹, S.V. Belyakov², A.I. Popov¹,

ANALYSIS OF SURFACE MORPHOLOGY AFTER JET ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT OF SLM MATERIALS

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

²Bauman Moscow State Technical University

Abstract

The work examines changes in the surface morphology of materials obtained by selective laser melting in the process of jet electrolyte-plasma processing. The study was carried out for Inconel 718, EP648, AISI 316L alloys obtained by SLM technology. The possibility of dimensional and finishing processing of these materials is considered. Research results show that the most significant changes in the roughness parameter Ra are achieved through dimensional processing. The greatest influence on the speed of dimensional processing is exerted by an increase in the current density on the surface of the sample, the volume of the electrolyte passed through and its concentration. A decrease in the roughness parameter Ra of the machined surface during finishing occurs with an increase in the process temperature, a decrease in the speed of movement of the current supply, optimization of the geometry of the electrode tools and selection of the electrolyte. The surface morphology was studied. It is shown that the surface can have numerous defects associated with the process of obtaining the workpiece. Electrostatic modeling of the electrolyte-plasma treatment process was carried out using the COMSOL Multiphysics package. The influence of surface roughness of different levels on the magnitude of the electric field strength is considered. It is shown that the localization of the electric field strength at the tops of macroroughness is favorably reflected in dimensional processing when removing the surface macrorelief. The experimental data obtained can be used for jet electrolyte-plasma processing of medical instruments, turbine blades and other products obtained by selective laser melting.

Key words: jet, electrolyte, plasma, LSM, morphology, surface, modeling

REFERENCES

- [1] Popova, A. I. Methods and mechanisms for managing the innovative potential of a research organization: specialty 08.00.05 “Economics and management of the national economy (by industry and field of activity, including: economics, organization and management of enterprises,

- industries, complexes; regional economics; economics of population and demography; economics of entrepreneurship; economic security; land management; dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences / Popova Alla Ivanovna. – St. Petersburg, 2009. – 15 p. – EDN NKSOTF.
- [2] Study of phase transitions during heat treatment of PH1 stainless steel obtained by selective laser melting / A. S. Lescheva, A. I. Gorunov, A. N. Mukhametov, A. A. Arslanov // Innovative machine-building technologies, equipment and materials - 2018 (MNTK "IMTOM-2018"): Materials of the IX International Scientific and Technical Conference, Kazan, December 05–07, 2018. Volume Part 1. - Kazan: Joint Stock Company "Kazan Research Institute of Aviation Technologies", 2018. - P. 89-92. – EDN ZBWYXB.
- [3] Chemical-thermal processing of parts obtained by selective laser melting / O. V. Chudina, V. A. Zorin, A. A. Brezhnev [etc.] // Welding production. – 2022. – No. 5. – P. 35-40. – EDN CIXQOU.
- [4] Tsvetkova, E. V. Features of the structure and properties of austenitic steel 03X17H14M3 after selective laser melting and heat treatment / E. V. Tsvetkova, K. O. Bazaleeva // XIV international seminar on the structural principles of modifying materials MNT-XIV: Abstracts XIV international seminar, Obninsk, June 13–15, 2017. - Obninsk: Obninsk Institute of Nuclear Energy - branch of the federal state autonomous educational institution of higher education "National Research Nuclear University "MEPhI", 2017. - P. 76. - EDN YZEVXH.
- [5] Study of approaches to post-processing of parts obtained by selective laser melting / A. A. Voznesenskaya, D. A. Kochuev, A. V. Kireev [etc.] // Modern problems of physics and technology: VIII International youth scientific school-conference, Moscow, April 15–20, 2019. Volume Part 1. - Moscow: National Research Nuclear University "MEPhI", 2019. - P. 195-196. – EDN YVJYDA.
- [6] Patent No. 2716926 C1 Russian Federation, IPC C22F 1/18, C22F 3/00, C23C 8/10. Method for complex hardening treatment of a product made of titanium alloy Ti-6Al-4V, obtained by additive manufacturing: No. 2019134357: application. 10/28/2019: publ. 03/17/2020 / A. V. Panin, S. V. Panin, S. A. Martynov [etc.]; applicant Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPPM SB RAS). – EDN GIVJYX.
- [7] Quitzke, Susanne & Kröning, Oliver & Safranchik, Daniel & Zeidler, Henning & Danilov, Igor & Martin, André & Böttger-Hiller, Falko & Essel, Shai & Schubert, Andreas. (2022). Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*. 75. 1123-1133. 10.1016/j.jmapro.2022.01.064.

- [8] Electrophysical regularities of jet electrolyte-plasma processing / A. I. Popov, A. A. Moskalets, S. V. Belyakov [etc.] // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2023. – T. 1, No. 1(43). – P. 4-19. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-4-19. – EDN GHWUVC.
- [9] Lyubimov, V.V., Volgin, V.M., Krasilnikov, V.P. (2020). Investigation of Kinematic–Geometric Characteristics of Electrochemical Machining. In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_42
- [10] P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle, D. Ryabkov, Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview, Surface and Coatings Technology, Volume 201, Issue 21, 2007, Pages 8746-8760, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023>.
- [11] Kylyshkanov, M.K. Influence of electrolyte-plasma hardening modes on the structure and properties of drill bit steel / M.K. Kylyshkanov, K.K. Kombaev // Proceedings of the University. – 2009. – No. 2(35). – pp. 16-18. – EDN QZLZJN.
- [12] Popov, A.I. Hydrodynamic features of jet electrolyte-plasma discharge / A.I. Popov // Mechanical engineering technology. – 2023. – No. 6. – P. 5-17. – EDN FWIRAM.
- [13] Popov, A. I. Analysis of morphology under the influence of an electrolytic jet on the surface of stainless steels / A. I. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2023. – T. 4, No. 4(46). – P. 35-48. – DOI 10.34220/2311-8873-2023-35-48. – EDN ICUPCZ.
- [14] Popov, A. I. Atomic dislocation model for removing surface layers by jet electrolyte-plasma polishing / A. I. Popov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2024. – T. 1, No. 1(47). – P. 31-51. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-31-51. – EDN DWAPMM.