
Научная статья

УДК 669.018.95:621.791.724

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-3-11

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ VAS1. Часть 2

Д.А. Добрынин¹, Т.В. Павлова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Изучено влияние добавок в базовом электролите, рабочего напряжения и температуры электролита на качество процесса электролитно-плазменного полирования деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки VAS1. Проведено электролитно-плазменное полирование конструктивно-подобного образца детали типа «Кронштейн». Разработана технология электролитно-плазменного полирования деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки VAS1.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, электролитно-плазменное полирование, 3D-печать, селективное лазерное сплавление, металлопорошковая композиция, алюминиевый сплав марки VAS1, конструктивно-подобный образец

Для цитирования: Добрынин Д.А., Павлова Т.В. Электролитно-плазменное полирование деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки VAS1. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-3-11.

Scientific article

ELECTROLYTE-PLASMA POLISHING OF PARTS MADE BY SELECTIVE LASER SINTERING FROM METAL POWDER COMPOSITION OF ALUMINUM ALLOY GRADE VAS1. Part 2

D.A. Dobrynin¹, T.V. Pavlova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The influence of additives in the base electrolyte, operating voltage and temperature of the electrolyte on the quality of the process of electrolyte-plasma polishing of parts manufactured by selective laser sintering from a metal powder composition of aluminum alloy grade VAS1 was studied. Electrolyte-plasma polishing of a structurally similar sample of a «bracket» type part was carried out. A technology has been developed for electrolyte-plasma polishing of parts manufactured by the selective laser sintering method from metal powder composition aluminum alloy grade VAS1.

Keywords: electrochemical treatment, electrolyte-plasma polishing, 3D-printing, selective laser sintering, metal powder composition, aluminum alloy grade VAS1, structurally similar sample

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 12 (130), 2023.

For citation: Dobrynin D.A., Pavlova T.V. Electrolyte-plasma polishing of parts made by selective laser sintering from metal powder composition of aluminum alloy grade VAS1. Part 2. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-3-11.

Введение

Использование 3D-печати для изготовления деталей из металлопорошковой композиции (МПК) [1–4] требует современных способов постобработки [5–7]. В первой части данной статьи описаны традиционные (механический, химический и электрохимический) способы постобработки деталей [8, 9], полученных в процессе 3D-печати из МПК методом селективного лазерного сплавления (СЛС). Описаны основные преимущества и недостатки этих способов уменьшения шероховатости поверхности. В качестве альтернативы рекомендован способ электролитно-плазменного полирования (ЭПП) поверхности, который является более высокопроизводительным и менее токсичным.

Разработан базовый состав раствора для ЭПП образцов, полученных в процессе 3D-печати из МПК алюминиевого сплава марки VAS1 методом СЛС. Показано, что ЭПП приводит к уменьшению параметра шероховатости поверхности R_a как минимум в 5 раз, образцы после постобработки имели светлую матовую поверхность.

Исследовано влияние содержания базового компонента в растворе на результат ЭПП образцов. При содержании базового компонента в растворе от 30 до 40 г/л наблюдается хорошее качество постобработки.

Во второй части данной статьи представлены результаты исследования влияния на качество ЭПП образцов из сплава VAS1 добавок в базовом растворе, температуры раствора и напряжения между электродами в электролитической ванне.

Материалы и методы

Для исследований использовали образцы в виде брусков (12×12×63 мм) и пластин (100×50×3 мм). Элементный состав сплава VAS1 представлен в табл. 1. Плотность сплава составила 2,66 г/см³.

Таблица 1

Элементный состав сплава марки VAS1*

Содержание элементов, % (по массе)						Содержание примесей, % (по массе), не более			
Al	Si	Mg	Cu	Zr	Se	Fe	Ni	прочие	
								каждой	сумма
Основа	8,5–11,5	0,35–0,90	0,4–1,0	0,15–0,35	0,10–0,35	0,20	0,05	0,05	0,10

* Защищено патентом РФ № 2661525.

Для ЭПП образцов использовали лабораторную установку, состоящую из емкости для раствора, chillera и тэнов, источника тока, пульта управления, системы очистки и автоматического поддержания температуры раствора.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a (шероховатость поверхности) определяли с помощью контактного профилометра.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В работах [10–12] приведены составы многокомпонентных растворов для ЭПП деталей из сплавов на основе алюминия. Вторым компонентом таких растворов является

органическая (щавелевая или лимонная) или неорганическая кислота (соляная). Согласно источникам, концентрация кислоты в растворе может составлять до 30 г/л.

Для исследования влияния добавки на качество ЭПП образцов приготовлены растворы, содержащие 30 г/л базового компонента и 10 г/л кислоты. Выполнено ЭПП образцов при напряжении между электродами 340 В и температуре раствора до 85 °С. Продолжительность ЭПП составила 10 мин. Результаты ЭПП образцов в растворе с кислотой представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние добавок в растворе на результаты электролитно-плазменного полирования

Добавка	Результат обработки
Щавелевая кислота ($C_2H_2O_4$)	Белый налет (смывается водой), поверхность в мелком питтинге
Лимонная кислота ($C_6H_8O_7$)	Повышение отражающего эффекта на поверхности (мутный блеск)
Соляная кислота (HCl)	Светлая выглаженная поверхность, имеются участки с темным шламом и питтинги разного размера

Добавление лимонной кислоты в базовый электролит приводит к повышению отражающего эффекта на обработанной поверхности образца, которая становится выглаженной и приобретает мутный блеск. Однако при обработке образца более 20 мин в выбранном составе электролита и при предложенном режиме на поверхности образовались точечные питтинги, имеющие вид дефектов, которые возникают от эрозионного воздействия при ЭПП при высоком напряжении между электродами (рис. 1).







Рис. 1. Внешний вид образца до (а) и после (б) электролитно-плазменного полирования в растворе с добавкой лимонной кислоты (продолжительность обработки 30 мин)

По этой причине рекомендовано уменьшить напряжение между электродами до 320 В [13, 14]. Это способствовало повышению качества ЭПП – поверхность образцов стала выглаженной с мутным блеском без питтингов (табл. 3).

Высокая температура электролита обеспечивает низкие значения плотности тока, что позволяет обрабатывать крупногабаритные детали на маломощном оборудовании. Но высокие значения температуры электролита в свою очередь приводят к его интенсивному испарению и быстрой выработке. Так, при ЭПП одного образца площадь обрабатываемой поверхности не превышает 25 см², в ванне с 4 л электролита при выбранном режиме и составе электролита продолжительность выработки раствора составляет до 15 мин, выработанный электролит имеет темно-коричневый цвет. При обработке в выработанном электролите более 15 мин происходит оседание травильного шлама на образце, поверхность становится темной, происходит травление граней и сторон образца, опущенных в раствор, с образованием глубоких питтингов.

Изучено влияние температуры (до 85 °С) раствора на качество ЭПП при напряжении между электродами 320 В, содержании базового вещества и лимонной кислоты в растворе 30 и 10 г/л соответственно (табл. 3).

Влияние температуры раствора электролита на результаты электролитно-плазменного полирования (ЭПП) образцов

Температура раствора, °С	Результат ЭПП	Внешний вид образца после ЭПП
От 80 до 85 °С	Поверхность выглаженная с мутным блеском, питтинги отсутствуют	
От 70 до 80 °С	Поверхность выглаженная с мутным блеском, качество ЭПП визуально ухудшается (поверхность имеет более шероховатый вид)	
От 60 до 70 °С	Поверхность выглаженная с мутным блеском. Качество поверхности сравнимо с результатом, полученным при температуре электролита от 70 до 80 °С, однако присутствуют неглубокие питтинги, отчетливо заметные на гранях образца	
От 50 до 60 °С	Продолжительность процесса 10 мин, дальнейшая обработка нецелесообразна ввиду низкого качества поверхности (на образцах имеется серый шлам, поверхность в мелком питтинге)	

Таким образом, для ЭПП деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС, можно рекомендовать растворы с температурой от 70 до 85 °С. Следует отметить, что при более низкой температуре уменьшается интенсивность парообразования и уноса раствора из рабочей ванны, но при этом снижается качество ЭПП, и наоборот, при более высокой температуре электролита увеличивается интенсивность парообразования и уноса раствора из рабочей ванны, но при этом повышается качество ЭПП.

Проведено ЭПП образцов в виде пластин при напряжении между электродами от 260 до 320 В в растворе, содержащем 30 г/л базового компонента и 10 г/л лимонной кислоты, при температуре до 85 °С (табл. 4). Выбор образцов в виде пластин обусловлен влиянием геометрической формы на рабочий режим и качественный результат процесса ЭПП.

Таблица 4

Влияние напряжения между электродами на результаты электролитно-плазменного полирования (ЭПП) образцов

Напряжение между электродами, В	Результат ЭПП
320	Поверхность выглаженная, на образцах присутствуют питтинги, имеющие вид дефектов, возникающих от эрозионного воздействия при ЭПП при высоком рабочем напряжении
300	Поверхность выглаженная, уменьшается площадь поверхности, покрытой питтингами
280	Уменьшение питтингообразования, качество обработки значительно улучшается
260	Поверхность выглаженная, на образцах отсутствуют питтинги. Понижение напряжения между электродами до 250 В и менее вызывает разогрев образца, при ЭПП возможно оплавление граней

Внешний вид образца в виде пластины до и после ЭПП в растворе с лимонной кислотой при напряжении между электродами 260 В и температуре раствора до 85 °С приведен на рис. 2.

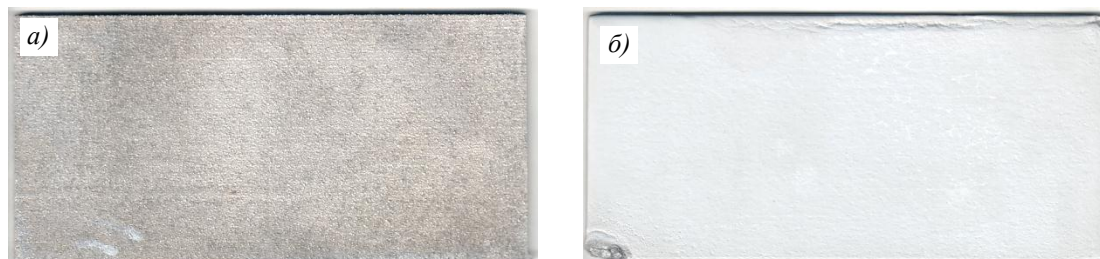


Рис. 2. Внешний вид образца в виде пластины до (а) и после (б) электролитно-плазменного полирования при напряжении между электродами 260 В. На образце после обработки оплавился угол в месте контакта образца с подвесом

Определено среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a (шероховатость поверхности) при напряжении между электродами 260 и 320 В и продолжительности ЭПП 30 мин (табл. 5).

Таблица 5

Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a в зависимости от продолжительности электролитно-плазменного полирования (ЭПП) образцов в виде пластин

Продолжительность ЭПП, мин	Отклонение профиля поверхности R_a , мкм, при напряжении между электродами, В	
	320	260
0	<u>41,67; 46,58; 48,65</u> 45,63	<u>46,77; 44,49; 41,69</u> 44,32
5	<u>17,05; 17,73; 18,21</u> 17,66	<u>14,23; 15,57; 14,65</u> 14,82
10	<u>14,11; 14,46; 14,82</u> 14,46	<u>11,39; 12,01; 11,48</u> 11,63
20	<u>11,75; 11,87; 12,04</u> 11,89	<u>9,16; 9,27; 9,19</u> 9,21
30	<u>9,69; 10,86; 8,49</u> 9,68	<u>7,04; 7,53; 7,28</u> 7,28

Примечание. В числителе указаны измеренные значения, в знаменателе – среднее.

Значение среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a для образца, подвергнутого ЭПП в течение 30 мин при напряжении между электродами 320 В, изменилось с 45,63 до 9,68 мкм, в среднем в 4,7 раза (или на 78,8 % относительно исходного значения), при напряжении 260 В – от 44,32 до 7,28 мкм, в среднем в 6,1 раза (или на 83,6 % относительно исходного значения).

Таким образом, для ЭПП образцов, не требующих декоративного блеска, применимы растворы с содержанием основного компонента от 30 до 40 г/л. Для декоративной отделки с получением поверхности с мутным блеском применимы растворы с содержанием основного вещества 30 г/л и лимонной кислоты 10 г/л. Температура раствора должна составлять до 85 °С, напряжение между электродами – от 260 до 320 В. При этом напряжение между электродами и состав раствора необходимо выбирать на стадии отработки технологии для конкретной детали, так как ее геометрические размеры и технология 3D-печати оказывают значительное влияние на режим ЭПП.

Следует отметить, что для повышения качества электрохимической обработки часто применяют двухатомные (холодные методы) и трехатомные (горячие методы) спирты [15]. Поскольку ЭПП является горячим процессом, авторы работ [10–12] рекомендуют для улучшения равномерности обработки деталей из сплавов на основе алюминия применять глицерин ($C_3H_8O_3$) в количестве от 5 до 10 г/л. Однако электролиты с органическими добавками при высоких температурах и напряжениях между электродами подвержены разложению, поэтому в процессе ЭПП требуется полная замена электролита после его выработки, что нецелесообразно с экономической точки зрения. Такие электролиты можно использовать для разовой обработки крупногабаритных деталей в небольших объемах рабочего раствора, где отработанный электролит после обработки подлежит утилизации.

Поэтому от использования электролитов с добавками лимонной кислоты и глицерина для ЭПП крупногабаритных деталей, таких как конструктивно-подобные образцы (КПО) детали типа «Кронштейн», изготовленных методом 3D-печати из МПК сплава ВАС1, предложено отказаться. Для КПО детали типа «Кронштейн» ЭПП проводили в растворе с содержанием основного вещества 30 г/л при температуре до 85 °С и напряжении между электродами 260 В. Внешний вид КПО детали типа «Кронштейн» до и после ЭПП представлен на рис. 3. Значения среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a КПО детали типа «Кронштейн» в зависимости от продолжительности ЭПП приведены в табл. 6.

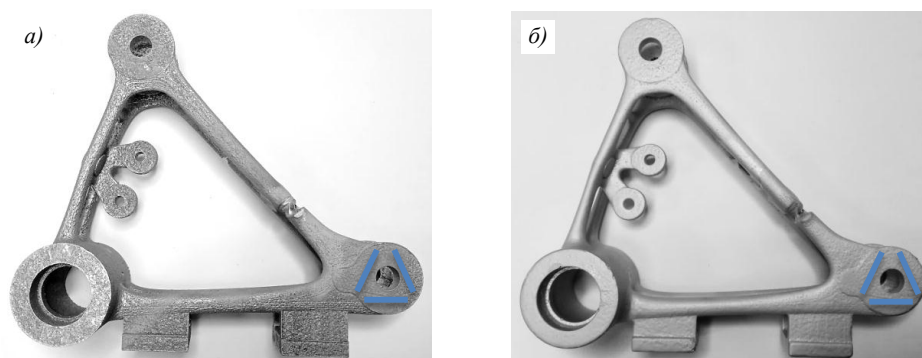


Рис. 3. Внешний вид конструктивно-подобного образца детали типа «Кронштейн» до (а) и после (б) электролитно-плазменного полирования при напряжении между электродами 260 В. Линиями обозначены места замера значения R_a

Таблица 6

Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a в зависимости от продолжительности электролитно-плазменного полирования (ЭПП) конструктивно-подобного образца детали типа «Кронштейн»

Продолжительность ЭПП, мин	Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a , мкм
0	<u>43,97; 46,21; 44,83</u> 45,01
5	<u>15,61; 16,39; 15,94</u> 15,68
10	<u>12,76; 13,88; 12,53</u> 13,06
20	<u>10,64; 11,05; 10,81</u> 10,83
30	<u>8,85; 8,79; 8,63</u> 8,76

Примечание. В числителе указаны измеренные значения, в знаменателе – среднее. Измерение проводили на трех областях поверхности конструктивно-подобного образца в районе отверстия для крепежа, расположенного рядом с поддержкой (см. рис. 3).

На основании полученных результатов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана технология ЭПП поверхности деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС.

Заключения

Исследовано влияние второго компонента (лимонной кислоты) в базовом электролите на качество ЭПП деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС. Добавление лимонной кислоты в количестве 10 г/л в базовый электролит приводит к усилению отражающего эффекта на обработанной поверхности, которая приобретает мутный блеск и выглаженный вид.

Изучено влияние температуры раствора на качество ЭПП поверхности образцов. Для ЭПП деталей можно рекомендовать растворы с температурой от 70 до 85 °С.

Установлено, что геометрическая форма образцов и деталей влияет на напряжение между электродами и качественный результат процесса ЭПП. Для ЭПП деталей, не требующих декоративного блеска, можно применять растворы с содержанием основного компонента от 30 до 40 г/л, для декоративной отделки с получением мутного блеска поверхности – растворы на основе базового компонента (30 г/л) с добавкой лимонной кислоты (10 г/л). Температура раствора в обоих случаях составляет 85 °С, напряжение между электродами – от 260 до 320 В.

Проведено ЭПП КПО детали типа «Кронштейн», полученного в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a КПО после ЭПП уменьшилось как минимум в 5 раз.

Разработана технология ЭПП поверхности деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электротехнология*. 2022. № 1. С. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электротехнология*. 2022. № 4. С. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электротехнология*. 2022. № 5. С. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
6. Неруш С.В., Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Тарасов С.А. Разработка технологии пайки деталей, полученных аддитивными технологиями, из металлопопорошковой композиции на основе кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.

7. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Воробьев Н.Н. Вопрос создания физических и математических моделей тепло- и массопереноса при изготовлении деталей методом аддитивных технологий (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
8. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник в 2 т. / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 240 с.
9. Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 382 с.
10. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларуская Навука, 2010. 232 с.
11. Способ электролитно-плазменной обработки изделий из алюминия и алюминиевых сплавов: пат. 7291 Респ. Беларусь; заявл. 16.07.15; опубл. 28.02.17.
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.
13. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Бойко А.Г. и др. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // *Успехи физики металлов*. 2005. Т. 6. С. 273–344.
14. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // *Вектор науки ТГУ*. 2012. № 4 (22). С. 144–147.
15. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / под ред. П.М. Вячеславова. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
6. Nerush S.V., Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Tarasov S.A. Development of brazing technology for parts obtained by additive technologies from cobalt based metal powder composition. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
7. Marakhovskij P.S., Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Vorobev N.N. On creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer during manufacturing by additive technologies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.

8. *Galvanic coatings in mechanical engineering: a reference book in 2 vols.* Ed. M.A. Shluger. Moscow: Mashinostroenie, 1985, vol. 1, 240 p.
9. Mirzoev R.A., Davydov A.D. *Anodic processes of electrochemical and chemical processing of metals: a textbook.* St. Petersburg: Publ. house of the Polytech. Univ., 2013, 382 p.
10. Kulikov I.S., Vaschenko S.V., Kamenev A.Ya. *Electrolytic-plasma processing of materials.* Minsk: Belarusian Navuka, 2010, 232 p.
11. *Method of electrolytic-plasma processing of products made of aluminum and aluminum alloys:* pat. 7291 Republic of Belarus; appl. 16.07.15; publ. 28.02.17.
12. Zakharov S.V., Korotkikh M.T. Electrolyte-plasma polishing of complex-shaped products made of aluminum alloy D16. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz–Antey»*, 2017, no. 3, pp. 83–87.
13. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N., Boyko A.G. et al. Electrolyte-plasma treatment and coating of metals and alloys. *Uspekhi fiziki metallov*, 2005, vol. 6, pp. 273–344.
14. Volenko A.P., Boychenko O.V., Chirkunova N.V. Electrolyte-plasma treatment of metal products. *Vektor nauki TGU*, 2012, no. 4 (22), pp. 144–147.
15. Grilikhes S. Ya. *Degreasing, etching and polishing of metals.* Ed. P.M. Vyacheslavov. 5th ed., rev. and add. Leningrad: Mashinostroenie, 1983, 101 p.

Информация об авторах

Добрынин Данил Аркадьевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлова Татьяна Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Danil A. Dobrynin, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatyana V. Pavlova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.10.2024.

The article was submitted 07.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.10.2024.