

Научная статья

УДК 669.018.95:621.791.724

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-19-27

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ VAS1. Часть 1

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. Приведен обзор традиционных методов полирования поверхности (механический, химический и электрохимический), которые применяют для обработки деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковых композиций. Описаны основные достоинства и недостатки рассмотренных методов. С учетом выявленных недостатков предложен более производительный и экологичный метод электролитно-плазменного полирования поверхности. Приведен ряд исследований, направленных на разработку состава электролита для электролитно-плазменного полирования деталей из металлопорошковых композиций алюминиевого сплава марки VAS1.

Ключевые слова: электролитно-плазменное полирование, селективное лазерное сплавление, металлопорошковая композиция, алюминиевый сплав марки VAS1

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 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-19-27.

Scientific article

ELECTROLYTE-PLASMA POLISHING OF PARTS MADE BY SELECTIVE LASER SINTERING FROM METAL POWDER COMPOSITION OF ALUMINUM ALLOY GRADE VAS1. Part 1

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 article provides an overview of traditional surface polishing methods (mechanical, chemical and electrochemical), which are used for processing parts made by selective laser sintering from metal powder compositions. The main advantages and disadvantages of these methods are described. Taking into account the identified shortcomings, a more high-performance and environmentally friendly method of electrolyte-plasma surface polishing has been proposed. A number of works have been carried out aimed at developing an electrolyte composition for electrolyte-plasma polishing of parts made of metal powder composition aluminum alloy grade VAS1.

Keywords: electrolyte-plasma polishing, selective laser sintering, metal powder composition, aluminum alloy grade VAS1

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 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-19-27.

Введение

Технологии аддитивного производства находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1–5], в частности в авиационной для изготовления деталей двигателей, крыльев, салона и других частей самолетов. В связи с этим необходимы современные технологии обработки деталей, полученных методом аддитивного производства [6–8].

Для уменьшения уровня шероховатости поверхности деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из металлопорошковых композиций (МПК), применяют методы механического, химического и электрохимического полирования.

Механическое полирование поверхности крупногабаритных деталей проводят абразивными кругами и лентами с использованием полировальных паст, включающих абразивный компонент (порошки оксидов алюминия, железа, хрома), связывающий агент (воскоподобные вещества) и различные поверхностно-активные вещества для повышения смачиваемости поверхности. Полирование мелких деталей проводят в галтовочных барабанах, вибрационных камерах с абразивными материалами (керамические гранулы, стальная дробь, стеклянные шарики). Для интенсификации процесса в рабочее пространство вводят различные жидкие химические добавки (мыла, поверхностно-активные вещества, щелочные и кислотные растворы), способствующие удалению полировального шлама с поверхности деталей.

Механическое полирование в зависимости от выбранного метода позволяет получить уровень шероховатости поверхности R_a от 1,6 до 0,05 мкм [9].

Методы механического полирования достаточно просто реализовать, однако им присущи высокая трудоемкость, значительные временные и материальные затраты. При этом возможно изменение физико-механического состояния поверхности за счет внедрения частичек абразива в основу.

Для химического полирования обычно используют растворы щелочей или неорганических кислот. Шероховатость поверхности уменьшается в результате химического растворения неровностей. Одновременно с травлением материала основы происходит оксидирование. Наилучшее качество поверхности после полирования достигается при равенстве скоростей оксидирования и травления материала основы [10].

Основные преимущества метода химического полирования: применимость для обработки деталей с развитой геометрической формой (наличие отверстий, полостей, углублений, пазов и т. п.), низкая трудоемкость процесса, не требуется специализированного оборудования. При простоте реализации метод имеет несколько существенных недостатков: трудности с корректированием растворов из-за их быстрой выработки; токсичность для персонала и агрессивность компонентов, входящих в состав растворов, по отношению к материалу оборудования; возможное образование питтингов на обрабатываемой поверхности.

Для повышения производительности и уменьшения трудоемкости процесса используют электрохимическое полирование. Обработку, как правило, проводят при постоянном напряжении от 10 до 20 В в электролитах на основе неорганических кислот, при этом изделие подключают к положительному полюсу источника питания. Изменение шероховатости и формирование рельефа поверхности, уменьшение высоты неровностей и их сглаживание происходят за счет анодного электрохимического растворения материала, в результате чего повышаются уровни химических и механических свойств обработанной поверхности: коррозионная стойкость, износостойкость, упругость [10].

Метод электрохимического полирования имеет недостатки и достоинства метода химического полирования, но обладает рядом существенных отличий: не применим

для обработки внутренних полостей деталей, в которые невозможно поместить дополнительный электрод, глубоких отверстий, пазов, впадин; требуется специализированное оборудование (источники питания; системы улавливания взрывоопасных веществ (кислорода и водорода), образующихся в процессе работы).

Разновидностью метода электрохимического полирования деталей, изготовленных из металлических и полупроводниковых материалов, является метод электролитно-плазменного полирования поверхности. Обработку проводят при рабочих напряжениях >200 В в электролитах на основе неорганических солей. При высоких напряжениях на внешней поверхности детали, погруженной в электролит, образуется ионизированный парогазовый слой. Высокая напряженность (до 10^6 В/м) электрического поля в парогазовом слое приводит к образованию на выступах поверхности электрических разрядов, которые оплавливают выступы и оказывают гидродинамическое воздействие на обрабатываемую поверхность. Результатами этих воздействий, помимо анодного растворения материала детали, являются очистка от загрязнений различного рода и полирование поверхности с достижением величины шероховатости поверхности R_a до 0,05 мкм [11, 12].

Метод электролитно-плазменного полирования отличается от традиционных методов химического и электрохимического полирования использованием в качестве основного компонента электролитов неорганических солей. Такие электролиты менее токсичны по сравнению с кислотными и щелочными, просты в приготовлении, подлежат корректированию в процессе работы. Производительность электролитно-плазменного полирования в 3–4 раза выше по сравнению с механическим полированием и в 5–6 раз – по сравнению с электрохимическим полированием [13]. Как и электрохимическое полирование, электролитно-плазменное полирование не подходит для обработки внутренних полостей деталей, глубоких отверстий, пазов, впадин и требует больших затрат электрической энергии и специальных источников тока.

Данная работа направлена на разработку технологии электролитно-плазменного полирования поверхности деталей, изготовленных из МПК алюминиевого сплава ВАС1 методом СЛС, который является наиболее производительным и менее токсичным по сравнению с традиционными технологиями полирования. Приведены анализ научно-технической литературы в области электролитно-плазменного полирования деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, и результаты электролитно-плазменного полирования образцов из МПК алюминиевого сплава ВАС1.

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

Материалы и методы

Использованы образцы, изготовленные методом СЛС из МПК алюминиевого сплава ВАС1 в виде параллелепипедов размером 12×12×63 мм. Состав сплава, из которого получены образцы, приведен в табл. 1. Плотность сплава составила 2,66 г/см³.

Таблица 1

Химический состав сплава марки ВАС1*

Содержание элементов, % (по массе)						Содержание примесей, % (по массе) (не более)			
Al	Si	Mg	Cu	Zr	Ce	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.

Электролитно-плазменное полирование образцов из МПК алюминиевого сплава ВАС1 проводили на установке, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Установка состоит из электролитической ванны, системы поддержания температуры и фильтрации электролита, источника питания, блока управления установкой и может быть использована для проведения химических, электрохимических и электролитно-плазменных процессов.

Уровень шероховатости поверхности R_a измеряли с помощью портативного контактного профилографа-профилометра, который осуществляет в автоматическом режиме обсчет получаемой профилограммы в пределах базового участка и определяет числовое значение искомого параметра.

Результаты и обсуждение

В работе [13] исследована возможность электролитно-плазменного полирования широкой номенклатуры деталей из алюминия и деформируемых алюминиевых сплавов (АМГ, Д1, Д16, Д16П, АМЦ, АД33, АД35) в электролитах на основе неорганических солей (сульфата аммония, хлоридов аммония, железа (III) и калия) с массовой долей основного компонента не более 10 % и добавками соляной и щавелевой кислот. Полирование проводили в нагретом до температуры от 85 до 95 °С электролите при напряжении от 280 до 320 В. На основании проведенных исследований предложены три состава электролита для полирования алюминиевых сплавов, в которых достигается высокое качество обработки, поверхность приобретает блеск. Составы помимо воды и 2 % щавелевой кислоты содержат по 4 % хлоридов аммония, железа (III) и калия соответственно.

В работе [14] для электролитно-плазменного полирования алюминия и его сплавов предложено использовать электролит на основе хлорида калия с добавками щавелевой кислоты и глицерина. Температура электролита составила от 80 до 90 °С, рабочее напряжение – от 250 до 350 В. Содержание компонентов в электролите, % (по массе):

Хлорид калия	От 2 до 5
Щавелевая кислота	От 0,5 до 3,0
Глицерин	От 0,5 до 2,0
Вода	Остальное

В результате полирования деталей из деформируемого алюминиевого сплава АД35 при температуре электролита 80 °С и рабочем напряжении 320 В в течение 2 мин получена блестящая полированная поверхность с уровнем шероховатости R_a от 0,11 до 0,016 мкм.

В работе [15] исследовано влияние состава электролита на качество электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных изделий из алюминиевого сплава Д16 при рабочем напряжении 300 В и температуре электролита от 80 до 90 °С. Для приготовления электролитов использовали следующие вещества: фториды лития, натрия, кальция, гидрокарбонат натрия, гидроксид натрия, цитрат натрия, Трилон Б, нитраты натрия и аммония, тиосульфат натрия, сульфит натрия, сульфат аммония, фосфат натрия.

Установлено, что полирование сплава Д16 происходит в растворе на основе нитрата натрия, в остальных случаях наблюдаются травление, образование покрытия на поверхности или отсутствие реакций.

Для улучшения качества обработки предложен трехкомпонентный раствор на основе нитрата калия, содержащий следующие компоненты, % (по массе):

Нитрат калия	От 4 до 5
Лимонная кислота	От 2 до 3
Глицерин	От 0,5 до 1
Вода	Остальное

Наилучшие результаты полирования получены при обработке деталей в предложенном электролите при рабочем напряжении 320 В. Значение шероховатости поверхности R_a после обработки составляет 0,189 мкм.

На основе анализа и обобщения полученной информации в данной работе предложено проводить электролитно-плазменное полирование деталей из МПК алюминиевого сплава ВАС1 при рабочем напряжении от 250 до 380 В, температуре электролита от 40 до 90 °С. В качестве основных компонентов электролитов использовали хлорид аммония, хлорид железа (III), хлорид натрия или калия, нитрат натрия или калия, в качестве добавок – соляную кислоту, глицерин, щавелевую и лимонную кислоты соответственно.

Электролиты на основе хлоридов аммония, железа, натрия или калия, а также на основе нитрата натрия или калия, которые обычно используют для электролитно-плазменного полирования деталей из алюминия и его сплавов, не пригодны для полирования образцов из МПК алюминиевого сплава ВАС1. В этих электролитах происходит травление поверхности образцов с отложением травильного шлама черного цвета. Такой результат, по-видимому, обусловлен высоким содержанием кремния в материале основы – от 8,5 до 11,5 % (по массе).

Экспериментальным путем подобран базовый компонент электролита (концентрация 30 г/л) и проведено электролитно-плазменное полирование образцов из МПК алюминиевого сплава ВАС1 при рабочем напряжении 340 В и температуре электролита до 85 °С. Результатом обработки стало выглаживание поверхности образцов, поверхность стала светлой, блеск отсутствовал. Изменения значения параметра шероховатости поверхности R_a в зависимости от продолжительности процесса электролитно-плазменного полирования образцов из МПК сплава ВАС1 приведены в табл. 2.

Таблица 2

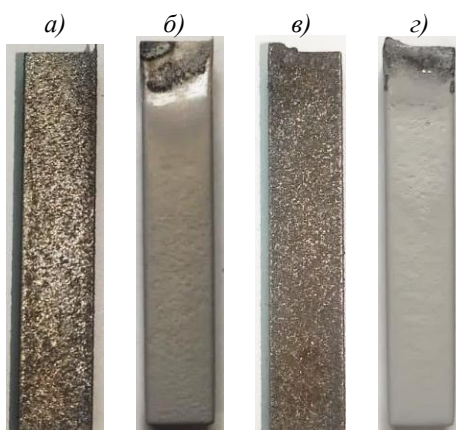
**Шероховатость поверхности R_a образцов
из металлопорошковой композиции сплава ВАС1**

Условный номер образца	Шероховатость поверхности*, мкм, при продолжительности полирования, мин				
	0	5	10	20	30
1	48,06	16,32	13,49	10,62	8,64
2	74,61	46,55	23,35	15,22	11,74

* Приведены средние значения, полученные по результатам трех измерений.

Внешний вид образцов из МПК сплава ВАС1 до и после электролитно-плазменного полирования представлен на рисунке.

Проведено электролитно-плазменное полирование поверхности образцов из МПК сплава ВАС1 в электролитах с концентрацией основного компонента 10, 20, 30, 40 и 50 г/л при рабочем напряжении 340 В и температуре электролита до 85 °С (табл. 3).



Внешний вид образцов из металлопорошковой композиции сплава ВАС1 до (а, в) и после (б, г) электролитно-плазменной обработки образцов 1 (а, б) и 2 (в, г)

Таблица 3

Результаты электролитно-плазменного полирования образцов из металлопорошковой композиции сплава ВАС1

Концентрация электролита, г/л	Результат обработки в электролите выбранного состава	Внешний вид образца после обработки
10	Нестабильность обработки, частое прекращение процесса. Выглаживание кончика образца, погруженного в электролит, с образованием бело-серого налета. На остальной части поверхности, погруженной в электролит, образовался темный шлам	 Продолжительность обработки составила 10 мин из-за нестабильности процесса
20	Пятнистая выглаженная поверхность. На кончике образца, погруженного в электролит, присутствует серый налет. Редкие прекращения процесса	
30	Светлая выглаженная поверхность по всей площади образца, погруженной в электролит, без блеска. Процесс стабилен	
40	Большая часть поверхности, погруженной в электролит, светлая, выглаженная, без блеска. На верхней части поверхности, погруженной в электролит, имеются блестящие участки с высоким значением шероховатости поверхности. Процесс стабилен	
50	Неравномерная обработка поверхности. Имеются блестящие участки на кончике образца, погруженного в электролит, имеющие высокое значение шероховатости поверхности. На средней части образца светлая выглаженная поверхность, на верхней части, погруженной в электролит, – темный шлам с локальными блестящими участками	

Электролиты с концентрациями основного компонента 10 и 20 г/л не обеспечивают удовлетворительного качества обработки поверхности образцов из МПК сплава ВАС1. В электролитах наблюдается нестабильность процесса, выражающаяся в частых или периодических его прекращениях, что обусловлено, по-видимому, недостаточной электропроводностью электролитов с низкой концентрацией.

Удовлетворительное качество обработки достигается в электролитах с концентрациями основного компонента 30 и 40 г/л. Обработанная поверхность светлая выглаженная, процесс стабилен. При концентрации электролита 50 г/л качество обработки снижается, на поверхности образца имеются локальные участки с неудовлетворительным качеством.

Для дальнейшего изучения влияния добавок, рабочего напряжения и температуры электролита в процессе электролитно-плазменного полирования на качество и количественные характеристики, шероховатость поверхности образцов из МПК сплава ВАС1 использованы электролиты с концентрациями основного компонента от 30 до 40 г/л. Результаты исследований будут отражены во второй части статьи.

Заключения

Приведен обзор традиционных методов полирования поверхности, которые применяют для обработки деталей, изготовленных методом СЛС из МПК. С учетом выявленных недостатков рассмотренных методов предложен более производительный и экологичный метод электролитно-плазменного полирования поверхности, который является разновидностью метода электрохимической обработки.

Приведены результаты исследований, посвященных разработке состава электролита для электролитно-плазменного полирования деталей, изготовленных методом СЛС из МПК алюминиевого сплава марки ВАС1. Электролиты на основе хлоридов аммония, железа, натрия или калия, а также на основе нитратов натрия или калия не пригодны для полирования образцов из МПК алюминиевого сплава ВАС1. В этих электролитах происходит травление поверхности образцов с отложением травильного шлама черного цвета.

Экспериментальным путем подобран базовый компонент электролита и проведено электролитно-плазменное полирование образцов из МПК алюминиевого сплава ВАС1 в предложенном электролите в течение 30 мин. В процессе обработки происходит выглаживание поверхности образцов, она становится светлой, блеск отсутствует, уровень шероховатости поверхности R_a после обработки уменьшается не менее чем в 5 раз.

Изучено влияние концентрации основного компонента на результат электролитно-плазменного полирования образцов из МПК сплава ВАС1. Установлено, что удовлетворительное качество обработки достигается в электролитах с концентрациями основного компонента 30 и 40 г/л.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

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 // *Электрометаллургия*. 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 // *Электрометаллургия*. 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 // *Электрометаллургия*. 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: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.

5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. 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. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
7. Неруш С.В., Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Тарасов С.А. Разработка технологии пайки деталей, полученных аддитивными технологиями, из металлопорошковой композиции на основе кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
8. 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: 10.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
9. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник в 2 т. / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 240 с.
10. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / под ред. П.М. Вячеславова. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.
11. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Бойко А.Г., Жадкевич М.Л., Калышканов М.К., Рузимов Ш.М. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // *Успехи физики металлов*. 2005. Т. 6. С. 273–344.
12. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // *Вектор науки ТГУ*. 2012. № 4 (22). С. 144–147.
13. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларуская навука, 2010. 232 с.
14. Способ электролитно-плазменной обработки изделий из алюминия и алюминиевых сплавов: пат. 7291, Республика Беларусь; заявл. 16.07.15; опубл. 28.02.17.
15. 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.

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. *Electrometallurgiya*, 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. *Electrometallurgiya*, 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. *Electrometallurgiya*, 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: October 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.

5. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. 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.
7. 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: October 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17.
8. 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: October 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
9. *Galvanic coatings in mechanical engineering: a reference book in 2 vol.* Ed. M.A. Schluger. Moscow: Mashinostroenie, 1985, vol. 1, 240 p.
10. Grilikhes S.Ya. *Degreasing, etching and polishing of metals*. Ed. P.M. Vyacheslavova. Ed. 5th, rev. and add. Leningrad: Mechanical Engineering, 1983, 101 p.
11. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N., Boyko A.G., Zhadkevich M.L., Kalyshekanov M.K., Ruzimov Sh.M. Electrolyte-plasma processing and coating of metals and alloys. *Uspekhi fiziki metallov*, 2005, vol. 6, pp. 273–344.
12. Volenko A.P., Boychenko O.V., Chirkunova N.V. Electrolyte-plasma processing of metal products. *Vektor nauki TGU*, 2012, no. 4 (22), pp. 144–147.
13. Kulikov I.S., Vashchenko S.V., Kamenev A.Ya. *Electrolytic-plasma processing of materials*. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2010, 232 p.
14. *Method of electrolyte-plasma processing of products made of aluminum and aluminum alloys*: pat. 7291, Republic of Belarus; appl. 16.07.15; publ. 28.02.17.
15. Zakharov S.V., Korotkikh M.T. Electrolytic-plasma polishing of complex-profile products made of aluminum alloy D16. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz–Antey»*, 2017, no. 3, pp. 83–87.

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 02.11.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.11.2023.

The article was submitted 02.11.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.11.2023.