

УДК 621.791.724

А.А. Никифоров¹, С.А. Демин¹, К.М. Хмелева¹**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-3-12

Использование аддитивных технологий производства деталей – один из главных трендов последних лет в сфере промышленного производства. Применение технологии «послойного выращивания» обеспечивает экономию материалов, значительное сокращение трудоемкости и позволяет создавать детали любых сложности и конфигурации.

Для снижения значений шероховатости поверхности деталей, изготовленных по аддитивной технологии, авторами предложен метод электрохимической обработки в кислотных электролитах, позволяющий добиться снижения значений шероховатости поверхности более чем в 5 раз, по сравнению с исходной, и обрабатывать детали любых сложности и конфигурации.

Ключевые слова: аддитивное производство, электрохимическая обработка, полирование, жаропрочный никелевый сплав, обработка поверхности, шероховатость поверхности.

А.А. Nikiforov¹, S.A. Demin¹, K.M. Khmeleva¹**ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF PARTS OBTAINED
BY SELECTIVE LASER FUSION**

The use of additive technologies for the production of parts is one of the main trends in recent years in the field of industrial production. Application of the technology of «layer-by-layer growing» provides savings in materials, a significant reduction in labor intensity, and allows you to create parts of any complexity and configuration.

To reduce the surface roughness values of parts manufactured using additive technology, the authors proposed a method of electrochemical treatment in acid electrolytes, which makes it possible to achieve a decrease in surface roughness values by more than 5 times compared to the original one, and to process parts of any complexity and configuration.

Keywords: additive manufacturing, electrochemical machining, polishing, high-temperature nickel alloy, surface treatment, surface roughness.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в качестве приоритетов технологического развития все больше предлагаются перспективные технологии, основанные на широком применении новых материалов, информационных технологий и глубокой автоматизации производственных процессов [1].

Технологии изготовления деталей методом прямого или селективного лазерного сплавления (СЛС) обеспечивают получение детали или заготовки в одну стадию инновационной (оригинальной) геометрической формы со сложной конфигурацией и наличием внутренних труднодоступных поверхностей [2].

Исследования показывают, что экономия сырья при использовании аддитивных технологий может достигать 75 %, тогда как в традиционных технологиях использование материала составляло в лучшем случае 50 %, а в некоторых видах обработки – не более 20–30 % [3].

Основным показателем качества поверхности детали является шероховатость поверхности, т. е. совокупность чередующихся впадин и выступов. Высокие значения шероховатости поверхности снижают такие эксплуатационные характеристики, как износостойкость, герметичность соединения, усталостная прочность детали, поверхностная теплопроводность и коррозионная стойкость [4]. Шероховатость поверхности может нарушать характер сопряжения деталей за счет смятия или интенсивного износа выступов профиля, в стыковых соединениях из-за значительной шероховатости снижается жесткость стыков, что может вызывать повышенный износ уплотнительных материалов, а также снижать качество лакокрасочных покрытий. Сильное влияние шероховатость оказывает на точность измерения деталей [5].

С повышением шероховатости облегчается смачивание металла и на его поверхности формируется больше активных мест, что увеличивает концентрацию реакционноспособных частиц коррозионной среды. На более гладкой поверхности формируется более плотная и однородная пленка оксидов, защищающих металл в начальный период развития коррозии [6].

Применение традиционных технологий обработки поверхности для деталей сложной конфигурации, полученных методом СЛС, трудоемко и не всегда обеспечивает требуемый результат, особенно на внутренних поверхностях [7].

Электрохимическая обработка поверхности позволяет добиться равномерного снижения шероховатости на всей поверхности детали при высокой скорости проведения процесса. Однако из-за неравномерного распределения силовых линий электрического тока по поверхности детали сложного профиля процесс электрохимической обработки деталей, полученных методом СЛС, требует выбора технологических параметров режима обработки для каждой детали [8].

Материалы и методы

Для исследований использованы образцы из жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, полученные методом СЛС на оборудовании Concept Laser M2 Cusing в среде азота, вырабатываемого штатным генератором Midigas 2 фирмы Concept Laser (Германия).

Горячее изостатическое прессование (ГИП) осуществляли в газостате Quintus-16 фирмы ASEA (Швеция).

Для полирования образцов (режим полирования: температура 70 °С, плотность тока от 25 до 100 А/дм²) использовали электролит следующего состава, г/л [9]:

H ₃ PO ₄ (плотность 1,65 г/см ³)	500–1100
H ₂ SO ₄ (плотность 1,85 г/см ³)	250–550
CrO ₃	30

Электрохимическую обработку образцов жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 осуществляли при помощи источника тока Flex Kraft 1M.

Параметры шероховатости определяли на лазерном 3D-профилометре Olympus LEXT OLS 4100.

Фотографирование поверхности образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе Phenom Pro X.

Результаты и обсуждение

Для исследования влияния режимов электрохимической обработки поверхности деталей, полученных методом СЛС, выбран жаропрочный никелевый сплав ВЖ159, имеющий высокие показатели свариваемости, применяемый для изготовления деталей камеры сгорания ГТД: жаровой трубы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и статорных элементов газотурбинных установок (ГТУ) [10–15].

Поверхность образца из сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, имеет волнообразный рельеф поверхности и содержит включения частиц исходного порошкового материала. На поверхности образца площадью 1 см^2 содержится $\sim(60\text{--}80)$ частиц диаметром $20\text{--}40 \text{ мкм}$ (рис. 1), что составляет исходную шероховатость R_a на уровне от 8 до 12 мкм .

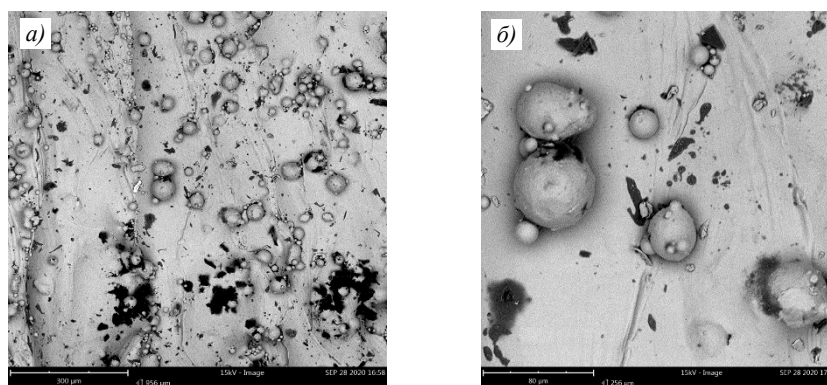


Рис. 1. Структура ($a - \times 1000$; $b - \times 1500$) поверхности образца из сплава ВЖ159, полученного методом СЛС

Волнообразный рельеф поверхности повторяется с периодичностью в $100\text{--}150 \text{ мкм}$. Такая структура образуется из-за выхода граней плоскости спекания слоя порошкового материала на поверхность.

Процесс электрохимической обработки происходит в растворе электролита при подключении детали в качестве анода и пропускании прямого электрического тока. Электролит представляет собой концентрированный раствор кислот с функциональными добавками. В процессе полирования рекомендуется перемешивать раствор или встряхивать детали в емкости. Это дает возможность устранять скопление пузырьков водорода на отдельных участках детали, что повышает качество обработки поверхности [16].

Сглаживание шероховатостей электрохимической обработкой связано с неравномерностью вторичного распределения тока по микрорельефу поверхности анода (детали) и концентрационными изменениями в прианодном слое электролита. Скорость растворения металла возрастает с уменьшением толщины вязкого прианодного слоя электролита на участках микровыступов поверхности. Эти факторы действуют при сглаживании сравнительно больших шероховатостей, но теряют свое значение по мере их уменьшения [17].

Формирование на аноде в процессе электрохимической обработки пассивирующей пленки способствует повышению электрохимической однородности ее поверхности, так как преимущественное растворение происходит на участках неоднородностей структурного и микрогеометрического происхождения, где толщина пленки меньше (рис. 2) [18].

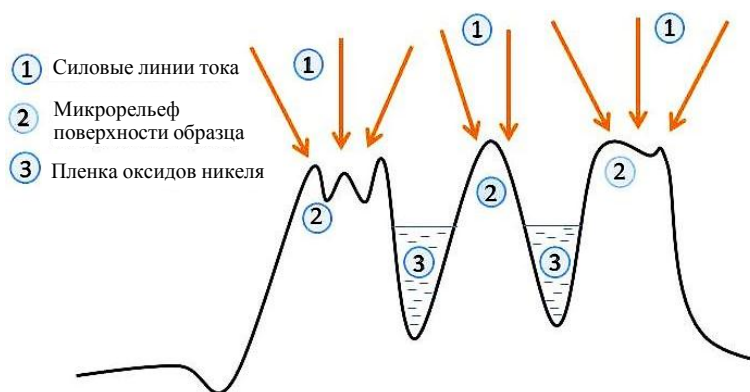


Рис. 2. Схема распределения силовых линий тока на поверхности образца из сплава ВЖ-159

На аноде одновременно происходит формирование и растворение оксидной пленки. Если скорость ее формирования относительно скорости травления больше, то результатом электролиза может стать образование оксидного слоя большой толщины. Преобладание процесса растворения пленки приведет к избыточному травлению металла. Эффект сглаживания неровностей наступает лишь при близких скоростях обоих процессов

Повышение температуры электролита до 65–70 °С способствует значительному улучшению внешнего вида образцов из жаропрочных никелевых сплавов. Это обусловлено тем, что процесс химического растворения оксидов металлов, входящих в состав сплавов, облегчается при увеличении температуры раствора. Частичное растворение оксидного слоя способствует повышению выхода по току реакции анодного растворения металла. При этом обеспечение баланса между процессами электрохимического образования поверхностных оксидов и их химического растворения способствует сглаживанию микропрофиля поверхности [19].

Влияние неоднородности поверхности на анодный процесс может быть столь велико, что пассивирующая оксидная пленка не способна его нивелировать, и тогда возникают дефекты поверхности – точечное травление, полосчатость и неравномерный блеск. Предотвратить появление дефектов можно за счет создания более совершенного пассивирующего слоя, что достигается введением в электролит хроматов. Изменение структуры и свойств пассивирующей пленки приводит и к изменению свойств поверхности анода. Уменьшается поверхностное натяжение на границе раздела «металл–газ», что облегчает отрыв выделяющихся при электролизе пузырьков кислорода и способствует предотвращению возникновения точечного травления.

Исследовано изменение шероховатости поверхности и массы образцов из сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, в зависимости от плотности тока и продолжительности электрохимической обработки (рис. 3).

В процессе электрохимической обработки установлены нелинейная зависимость изменения шероховатости поверхности образцов от плотности тока и линейное изменение убыли массы. В начальный момент процесса (от 0 до 3 мин) при значительной высоте участков поверхности с включениями макроразмерных частиц сказывается повышенная концентрация силовых линий тока на их вершинах, что сопровождается уменьшением их высоты. Увеличение продолжительности процесса (от 3 до 7 мин) приводит к дальнейшему выравниванию рельефа, однако при этом происходит также убыль массы металла на участках поверхности, прилегающих к макрочастицам. Скорость убыли массы металла снижается, а радиус закругления вершин увеличивается по мере их (вершин) скругления и перехода к волнообразному микрорельефу. После перехода к волнообразному рельефу скорость выравнивания поверхности существенно замедляется.

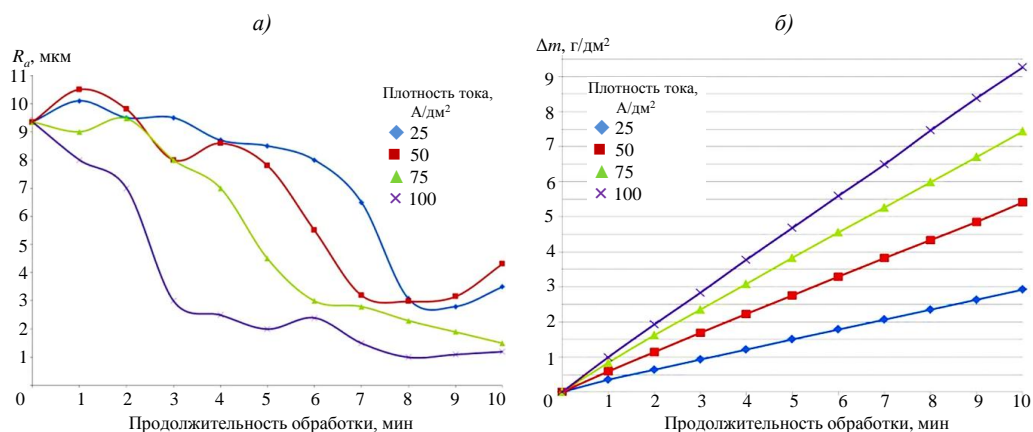


Рис. 3. Изменение значений шероховатости поверхности (а) и массы (б) образца из сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, в зависимости от плотности тока и продолжительности электрохимической обработки

При плотности тока 100 A/dm^2 шероховатость образцов достигает значений до $2,5 \mu\text{m}$ со второй минуты проведения процесса, и далее скорость процесса существенно замедляется, что объясняется снижением концентрации силовых линий тока на участках с макрорельефом и повышенной шероховатостью, а также более равномерным их распределением по рельефу поверхности образца. При снижении плотности тока электрохимической обработкой наблюдается аналогичный эффект изменения шероховатости, однако изменение значений шероховатости более плавное, что связано с более низкой скоростью процесса. На рис. 4 и 5 показан внешний вид участков образцов из сплава ВЖ159 после электрохимической обработки поверхности при различной плотности тока в течение 3; 5 и 10 мин.

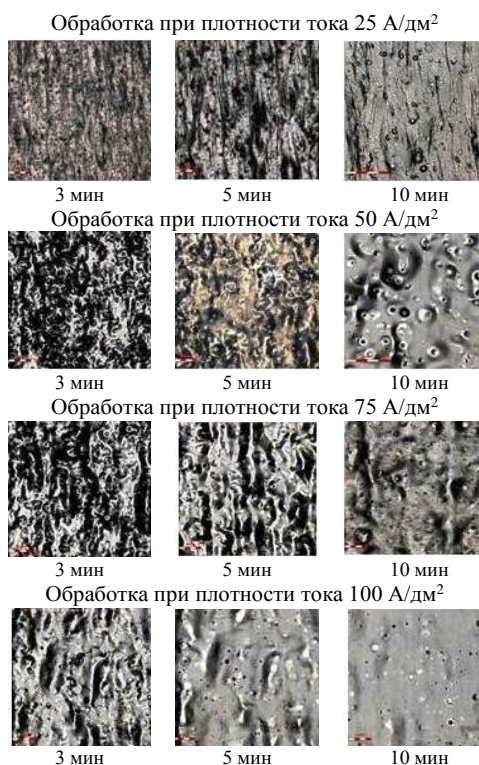


Рис. 4. Участки поверхности образцов из сплава ВЖ159 в зависимости от плотности тока и продолжительности обработки

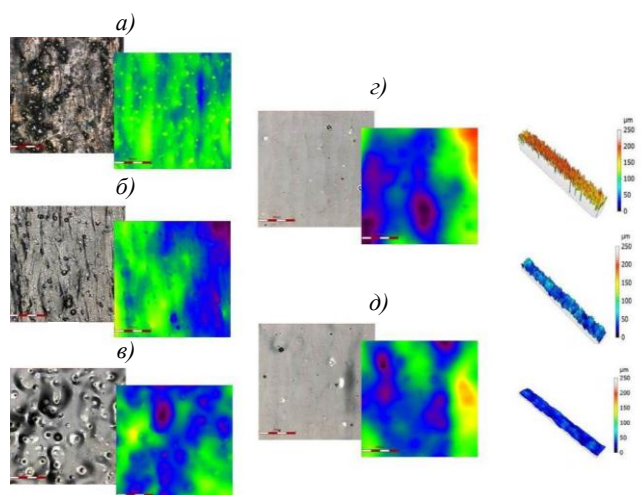


Рис. 5. Морфология поверхности образцов (*a* – без обработки) из сплава ВЖ159 после 10 мин электрохимической обработки при плотности тока 25 (*б*), 50 (*в*), 75 (*г*) и 100 А/дм² (*д*)

Увеличение продолжительности процесса электрохимической обработки способствует значительному сглаживанию рельефа поверхности образцов, однако при этом существенно увеличивается убыль массы металла. На рис. 6 представлена динамика изменения толщины образцов из сплава ВЖ159 в зависимости от плотности тока и продолжительности обработки и микрошлиф образцов, полученных при электрохимической обработке при плотности тока 100 А/дм².

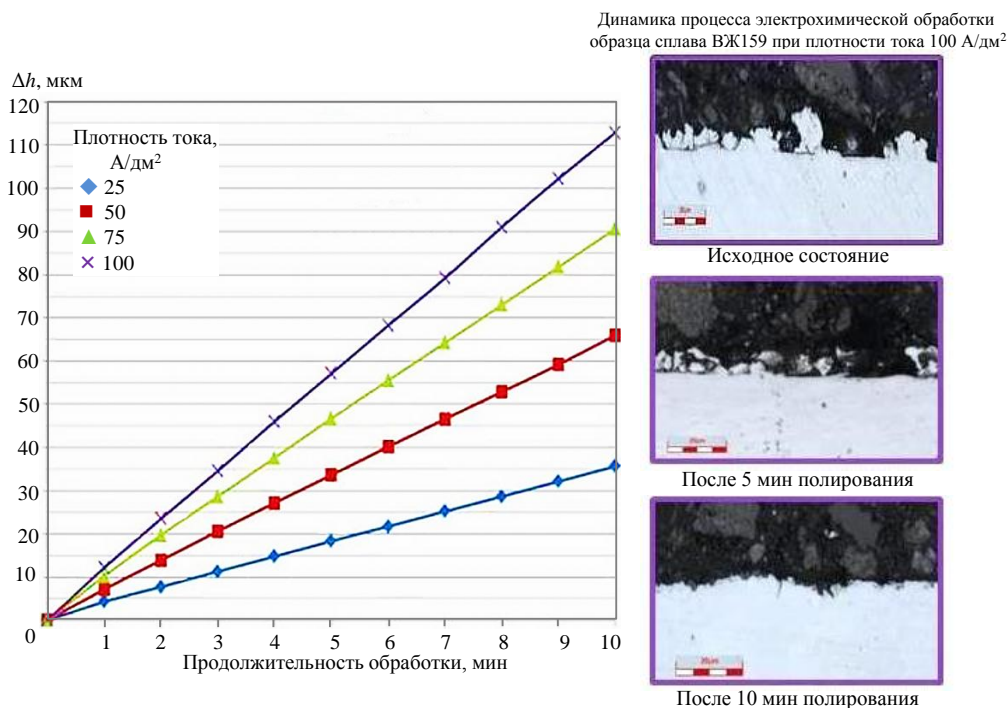


Рис. 6. Динамика изменения толщины образцов из сплава ВЖ159 в зависимости от плотности тока и продолжительности обработки

Для изучения механизма электрохимической обработки деталей, полученных методом СЛС, исследовано изменение параметров шероховатости R_{ku} и R_{sk} .

Параметр R_{ku} , определяющий островершинность профиля, характеризует остроту кривой плотности распределения выступов и впадин (рис. 7). Если значительная часть выступов и впадин сконцентрирована около средней линии поверхности, то параметр $R_{ku} = 3$.

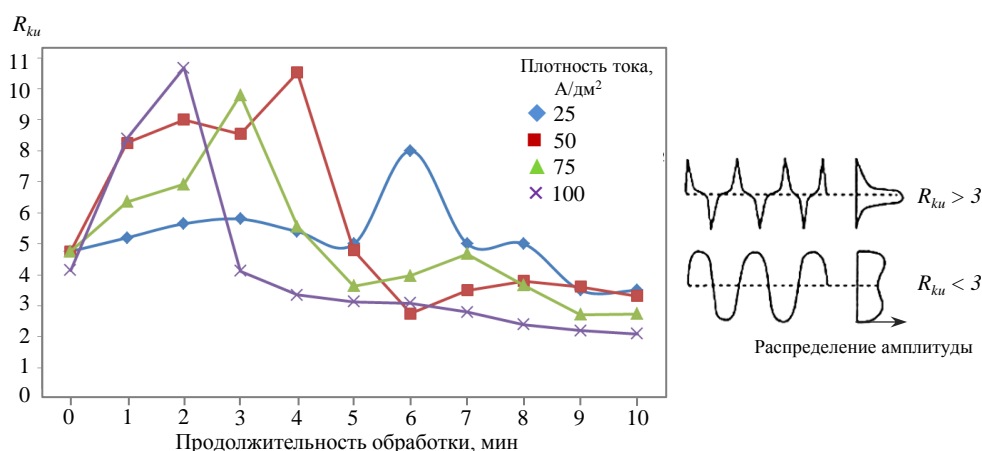


Рис. 7. Зависимость плотности распределения выступов и впадин на поверхности образцов из сплава ВЖ159 от плотности тока и продолжительности обработки

Увеличение значений параметра R_{ku} в начальный период обработки может свидетельствовать о том, что идет заострение частиц порошка, оставшихся на поверхности детали, а резкое снижение значений параметра R_{ku} в промежутке времени обработки от 3 до 5 мин – о полном растворении частиц порошка.

На основании полученных данных можно предположить, что процесс электрохимической обработки деталей, изготовленных методом СЛС и имеющих макрошероховатости на поверхности в виде частиц радиусом от 9 до 20 мкм, идет с большей интенсивностью на основной поверхности детали и меньшей – на поверхности частиц, что связано с различными значениями электрического сопротивления (рис. 8).

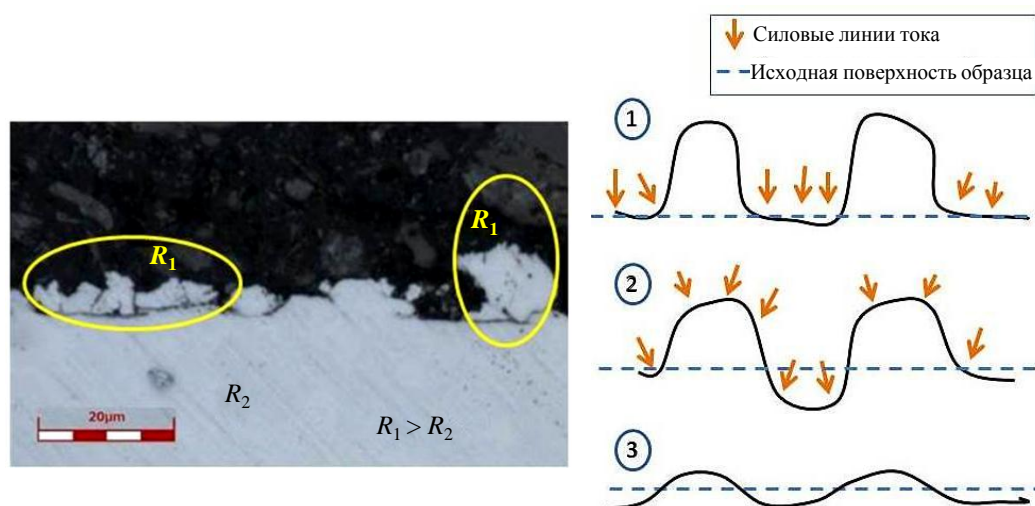


Рис. 8. Схема процесса электрохимической обработки деталей, полученных методом СЛС

По мере увеличения продолжительности процесса растет сопротивление на основной поверхности, что приводит к началу травления макрочастиц, постепенному

выравниванию профиля поверхности и переходу его к волнообразному рельефу с выравниванием силовых линий электрического тока, что значительно замедляет процесс сглаживания материала. При переходе к волнистому рельефу изменяется параметр R_{sk} , определяющий зависимость асимметрии неровности профиля поверхности (рис. 9).

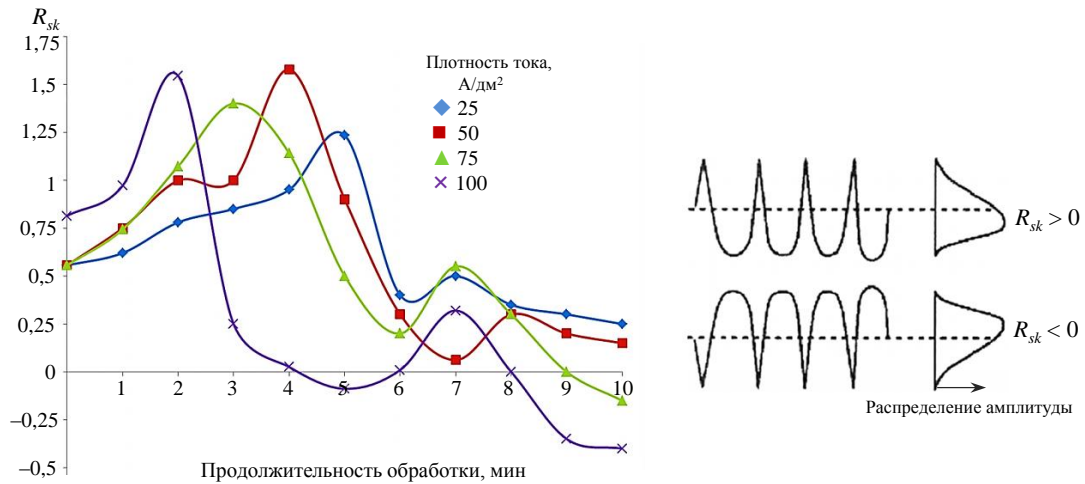


Рис. 9. Зависимость асимметрии неровности профиля поверхности образцов из сплава ВЖ159 от плотности тока и продолжительности обработки

При электрохимической обработке поверхностей сглаживаются прежде всего периодические неровности, идентичные по высоте и конфигурации, закономерность которых задана режимом формирования детали. Случайные, хаотично расположенные неровности неодинаковы по высоте и форме, поэтому сглаживаются менее интенсивно и полно. Микропрофиль изменяется в направлении преобразования его неровностей в более пологий вид со скругленными вершинами, что также с большей интенсивностью происходит у периодических неровностей.

Дальнейшее увеличение продолжительности электрохимической обработки (>10 мин) приводит к точечному растравливанию поверхности и образованию питтингов (рис. 10).

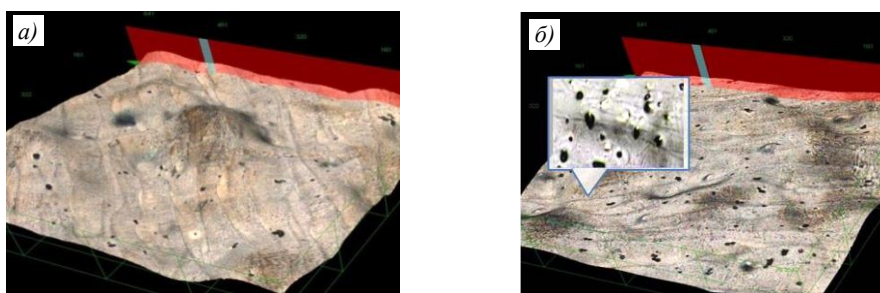


Рис. 10. Рельеф поверхности образца из сплава ВЖ159, полученного методом СЛС, после электрохимической обработки в течение 10 (а) и 15 мин (б) при плотности тока 100 А/дм²

Применение соединений Cr^{+6} замедляет процесс питтингообразования на поверхности жаропрочного сплава ВЖ159 благодаря созданию дополнительного пассивирующего слоя, однако по мере снижения шероховатости образца влияние ингибирования в процессе травления сплава пассивирующего слоя снижается, в результате чего возрастает скорость травления сплава в ортофосфорной кислоте.

Заключения

Проведенные исследования по применению процесса электрохимической обработки образцов из жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 доказали его эффективность – шероховатость снизилась в 5 раз по сравнению с исходными значениями. Таким образом, процесс электрохимической обработки является перспективным для обработки деталей, полученных методом СЛС, и обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами обработки. Процесс относительно простой и малозатратный, а на многих предприятиях уже имеется инфраструктура и необходимое оборудование.

Электрохимическая обработка в электролитах на основе неорганических кислот целесообразна там, где затруднено или невозможно провести механическую обработку (труднодоступные внутренние полости). При применении локального инструмента или экранов возможно также выборочно обрабатывать участки детали.

Дополнительно электрохимическую обработку можно использовать для снижения массы детали или утонения отдельных ее участков.

Внедрение в промышленность процесса изготовления деталей методом СЛС с последующей электрохимической обработкой может способствовать развитию рецептур электролитов с целью снижения их агрессивности, применению более эффективных добавок, влияющих на приэлектродный слой, а также развитию технологических приемов, улучшающих качество обработки поверхности, таких как использование нестационарных режимов электрического тока, ультразвуковой обработки и др.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Порошки избавляют от лишнего // Эксперт. 2014. № 49 (926). С. 46–51.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Эволюция структуры и свойств высокохромистого жаропрочного сплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления. Ч. I // Материаловедение. 2019. № 3. С. 9–17. DOI: 10.31044/1684-579X-2019-0-3-9-17.
4. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. № 1. С. 2–6.
5. Грилихес С.Я. Электрохимическое и химическое полирование: теория и практика. Влияние на свойство металлов. 2-е изд., перераб. Л.: Машиностроение, 1987. С. 17–19.
6. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1981. С. 216.
7. Суслов А.Г. Качество поверхности слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. С. 320.
8. Амирханова Н.А., Хамзина А.Р. Электрохимическое полирование жаропрочных никель-хромовых сплавов ХН45МВТЮБР и ХН50МВТЮБ // Металлообработка. 2008. № 1 (43). С. 17–21.
9. Грилихес С.Я. Электрохимическое и химическое полирование. М.: Машиностроение, 1987. С. 27.
10. Инженерия поверхности детали / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. С. 42.
11. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Артеменко Н.И. Абразивно-износостойкие материалы для уплотнений проточной части ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
12. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Ечин А.Б. Отработка технологического процесса получения отливок деталей газотурбинных двигателей «диффузор» из сплава ВЖ159 в условиях машиностроительного предприятия // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-20-28.

13. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
14. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // Электromеталлургия. 2016. № 9. С. 30–41.
15. Горбовец М.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом СЛС // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-50-55.
16. Лощинин Ю.В., Пахомкин С.И., Размахов М.Г. Температуры фазовых превращений и калориметрический анализ порошковых композиций жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-79-85.
17. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1983. С. 224.
18. Шибяев Б.А., Балмасов А.В. Электрохимическое полирование конструкционных легированных сталей // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. № 2. С. 24–25.
19. Донцов М.Г., Балмасов А.В., Семенова Н.В. Химическое и электрохимическое полирование меди – сходства и различия. II. Влияние поверхности слоев // Известия вузов. Сер.: Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. № 12. С. 54–58.