

Электрохимическая доводка аэродинамических профилей лопаточных колес

Лобода А.А., Мозгов С.А., д.т.н. проф. Саушкин Б.П.

Университет машиностроения

SAMozg@yandex.ru

Аннотация. В статье предложено изменение базовой технологии изготовления лопаток закрытых лопаточных колес, за счет применения доводочной операции для снятия дефектного слоя и снижения шероховатости поверхностей лопаток после операции электроэрозионной прошивки. Эффективность применения новой операции, вместо базовой, основанной на ручной доводке профиля лопаток, была подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями. Проведены эксперименты по подбору оптимальных параметров режима обработки и выбору оптимального электролита. Исследовано влияние различных параметров режима обработки на формирование микрогеометрии поверхности в процессе обработки.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, дефектный слой, шероховатость, рабочие колеса турбин.

В настоящее время существует широкая номенклатура изделий со сложными поверхностями, обработка которых традиционными методами затруднительна или принципиально невозможна [1-6]. К таким изделиям относятся различные закрытые лопаточные колеса ТНА ЖРД (рисунок 1), которые используются в аэрокосмических отраслях. Эти колеса получают из различных сплавов, одним из которых является сплав ЭП741-НП.

Высокая сложность профиля лопаток, стесненные условия обработки и низкий коэффициент резания ($k_p \approx 0,05$) накладывают жесткие ограничения на обработку таких изделий. Поэтому для получения лопаток используется операция электроэрозионной прошивки [6]. Данная обработка обеспечивает высокую точность поверхности с шероховатостью по $Ra = 5 \dots 10$ мкм. Однако этому методу свойственно наличие на поверхности обработки дефектного слоя величиной $30 \dots 40$ мкм.

Этот слой негативно влияет на эксплуатационные свойства изделия из-за наличия в нем концентраторов напряжения (микротрещин), что приводит к сокращению ресурса изделия. Высокая шероховатость поверхности лопаток снижает КПД изделия.



Рисунок 1. Рабочие колеса ТНА ЖРД

Наличие дефектного слоя и высокая шероховатость обработанных поверхностей требует введения в технологический процесс доводочной операции.

Однако сложный профиль поверхности, малые расстояния между лопатками и труднообрабатываемый резанием материал усложняют выбор доводочной операции. Были рассмотрены хорошо известные методы доводки: ручное шлифование и полирование поверхностей лопаток, пневмо- и гидроабразивная обработка, абразивная экструзия и др. Все эти методы имеют преимущества и недостатки. В настоящее время в качестве доводочной операции при изготовлении закрытых лопаточных колес ТНА ЖРД на заводах отрасли применяют ручное полирование. Трудоемкость данной операции составляет от 3 до 10 рабочих смен в зависи-

мости от типоразмера изделия.

Для снижения шероховатости и удаления дефектного слоя предложена электрохимическая доводочная операция таких изделий. Однако эффективность применения электрохимической доводочной операции очень сильно зависит от применяемого электролита и режимов обработки, поэтому необходимо было провести предварительные экспериментальные исследования по подбору электролита и определению оптимальных параметров режима обработки сплава ЭП741-НП.

Цель исследования – определение влияния электролита и режимов обработки на процесс выравнивания поверхности и удаления дефектного слоя.

Для решения поставленной задачи была разработана, спроектирована и изготовлена экспериментальная установка для электрохимической обработки (рисунок 2).

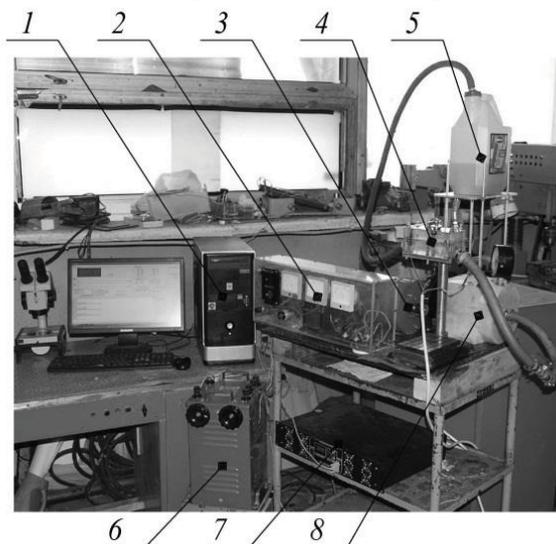


Рисунок 2. Экспериментальная установка: 1 – компьютер; 2 – пульт управления приводом насоса; 3 – привод насоса; 4 – экспериментальная ячейка; 5 – ёмкость с электролитом; 6 – латр; 7 – источник питания постоянного тока; 8 – насос

Основой установки является экспериментальная электрохимическая ячейка с длинномерным прямоточным щелевым каналом (4), используемая для физического моделирования процессов электрохимического растворения (рисунок 3).

Ячейка обеспечивает геометрическое, гидродинамическое, тепловое и энергетическое подобие реального и модельного процессов ЭХРО.

С помощью этой физической модели удобно оценивать скорость растворения материала электрода, энергоёмкость, точность формообразования, параметры микрогеометрии обработанной поверхности.

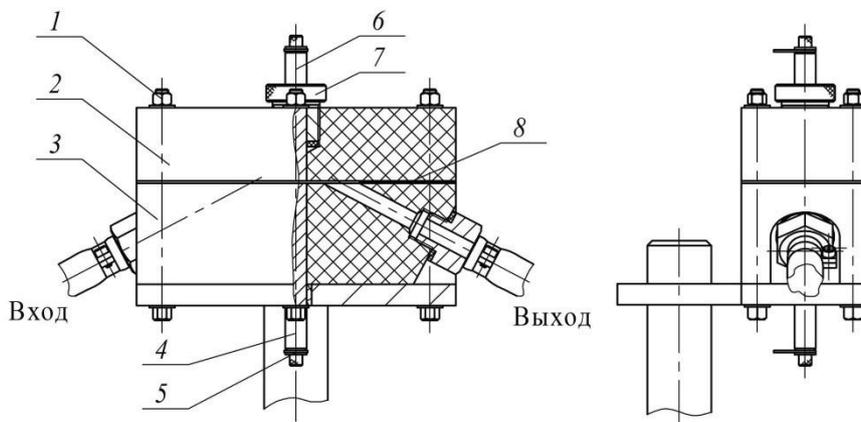


Рисунок 3. Общий вид ячейки с прямоточным щелевым каналом: 1 – стягивающие болты; 2 – верхняя плита; 3 – нижняя плита; 4 – нижний электрод; 5 – токоподвод; 6 – электрод-образец; 7 – крепежная гайка; 8 – мерная прокладка

Внешний вид ячейки с прямоточным щелевым каналом показан на рисунке 4.

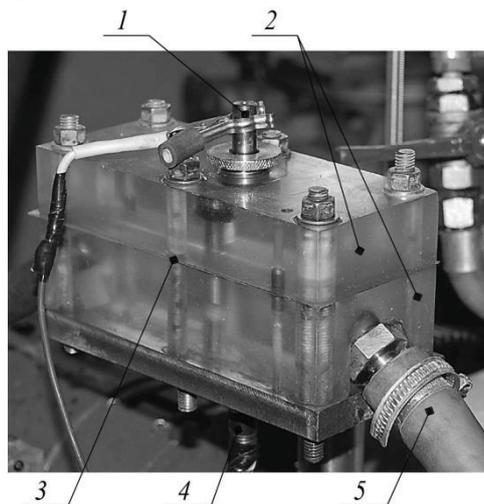


Рисунок 4. Экспериментальная ячейка: 1 – электрод-образец; 2 – верхняя и нижняя пластины ячейки; 3 – изолирующая прокладка; 4 – электрод-инструмент; 5 – шланг подачи электролита

Для проведения экспериментальных работ из данного материала были изготовлены образцы, представляющие собой прутки размерами 55x10 мм (рисунок 5). Торцевая поверхность заготовок была предварительно обработана электроэрозионным методом, шероховатость поверхности составляла по Rz 50...60 мкм, толщина дефектного слоя 30...40 мкм.

Перед началом экспериментов измерялась исходная шероховатость образцов на профилометре «Протон-МИЭТ 130», а начальная масса образцов - на весах Ohaus PA214C с точностью измерений до 10^{-4} г. После проведения электрохимической обработки эти параметры измерялись вновь, структура и морфология поверхности определялась на микроскопе Falcon.

Предварительно проведенная работа по поиску эффективных электролитов для электрохимической обработки таких сплавов позволила выбрать водные растворы солей: NaCl, NaNO₃ и их смесь, а также перхлоратный электролит на основе C₂H₆O₂NaNO₃ и CH₃ON.



Рисунок 5. Экспериментальные образцы

В водных растворах солей предварительно проводились эксперименты по подбору оптимальных параметров режима обработки. Были проведены эксперименты по влиянию температуры электролита, скорости прокачки жидкости и плотности тока.

Эти эксперименты показали, что высокая температура негативно влияет на процесс выравнивания шероховатости. При низкой скорости прокачки удаление продуктов реакции происходит не полностью, что ухудшает процесс выравнивания поверхности. При низкой плотности тока энергии, затрачиваемой на удаление металла, не хватает, процесс выравнивания не происходит.

Были получены следующие оптимальные параметры режима обработки: $i = 30 \text{ А/см}^2$; $v = 8 \text{ м/с}$; $T=22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты влияния состава электролита на процесс выравнивания шероховатости поверхности и съема металла представлены на рисунке 6. Наилучшие результаты получены в электролите состава 60 г/л NaCl + 40г/л NaNO₃. Удалось снизить шероховатость поверхности до 0,5 мкм (Ra) при скорости выравнивания 0,284 мм/мин, съем припуска составил 0,335 мм.

Морфология исходной и полученных поверхностей представлена на рисунке 7.

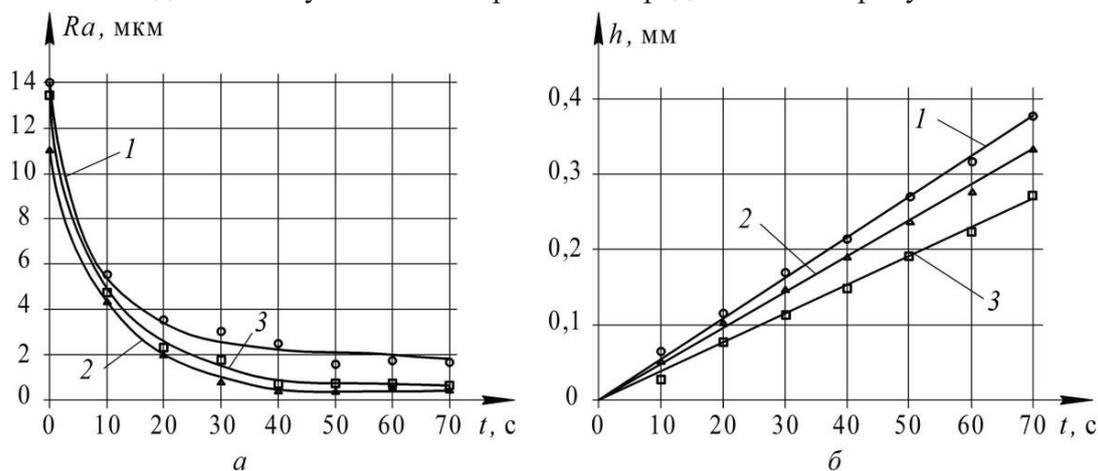


Рисунок 6. Влияние состава электролита на процесс выравнивания шероховатости (а) и съем металла (б) в электролитах: 1 - 124 г/л NaNO_3 ; 2 - 60 г/л NaCl + 40г/л NaNO_3 ; 3 – 80 г/л NaCl

Вторая серия экспериментов проводилась в электролите: 100 г/л NaClO_4 в $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$. В связи с тем, что данный электролит обладает низкой электропроводностью, обработка образцов производилась при плотностях тока $i = 0,5 - 2 \text{ A/cm}^2$ при концентрации 100 г/л NaClO_4 , скорости прокачки электролита $v = 1 \text{ м/с}$ и температуре $T=22^\circ\text{C}$. Все эксперименты проводились при скорости прокачки электролита $v = 1 \text{ м/с}$, т.к. при меньших скоростях удаление продуктов реакции происходило не полностью. Результаты экспериментов представлены на рисунке 8.

При низкой плотности тока ($i = 0,5 \text{ A/cm}^2$) затрачиваемой энергии не хватало на преодоление сопротивления вязкой пленки, образующейся на поверхности анода, выравнивание поверхности и съем припуска практически не происходили, на поверхности образовывалась защитная темная пленка. После этого для увеличения электропроводности концентрация соли в электролите была увеличена до 150 г/л. Эксперименты при плотности тока $i = 0,5 \text{ A/cm}^2$ в новом электролите не привели к улучшению процесса обработки.

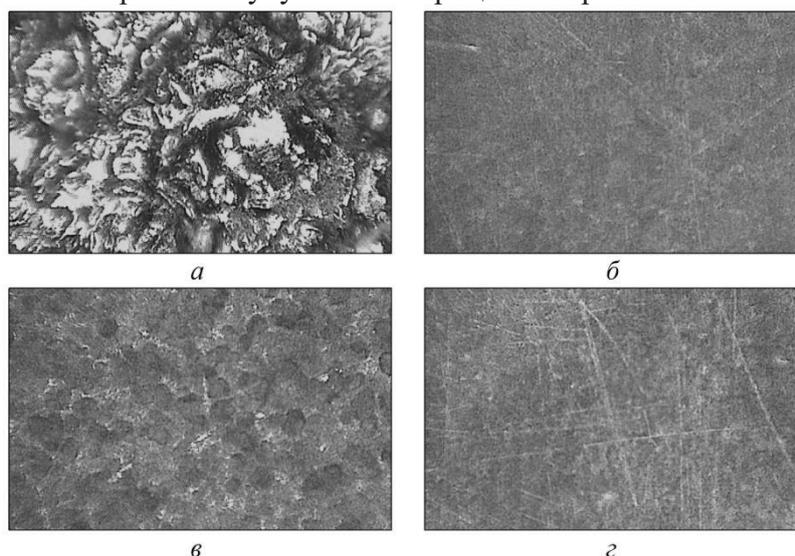


Рисунок 7. Изображения исходной поверхности (а), после обработки в растворе 80 г/л NaCl (б), после обработки в растворе 124 г/л NaNO_3 (в), после обработки в растворе 60 г/л NaCl + 40г/л NaNO_3 (г), при плотности тока $i = 30 \text{ A/cm}$ (x100)

При плотности тока $i = 1 \text{ A/cm}^2$ сначала происходил процесс выравнивания и съема с образованием защитной темной пленки, но после обработки процесс выравнивания ухудшался, что приводило к увеличению шероховатости.

При плотности тока 2 А/см^2 происходило относительно равномерное выравнивание шероховатости, что позволило снизить шероховатость до $1,4 \text{ мкм}$ (Ra), съём припуска составил $0,179 \text{ мм}$, поверхность обработки приобретала блестящий вид, но конце обработки стали наблюдаться следы струйности на поверхности из-за влияния гидродинамических процессов.

При $i = 4 \text{ А/см}^2$ процесс выравнивания происходил более интенсивно, шероховатость снизилась до 1 мкм (Ra), а величина съема припуска незначительно выросла до $0,188 \text{ мм}$, заметно сократилось время обработки с 9 до 4 минут. Все это позволяет выбрать эту плотность тока как оптимальную для данного электролита. Морфология исходной и полученных поверхностей при плотности тока $1, 2$ и 4 А/см^2 представлены на рисунке 9.

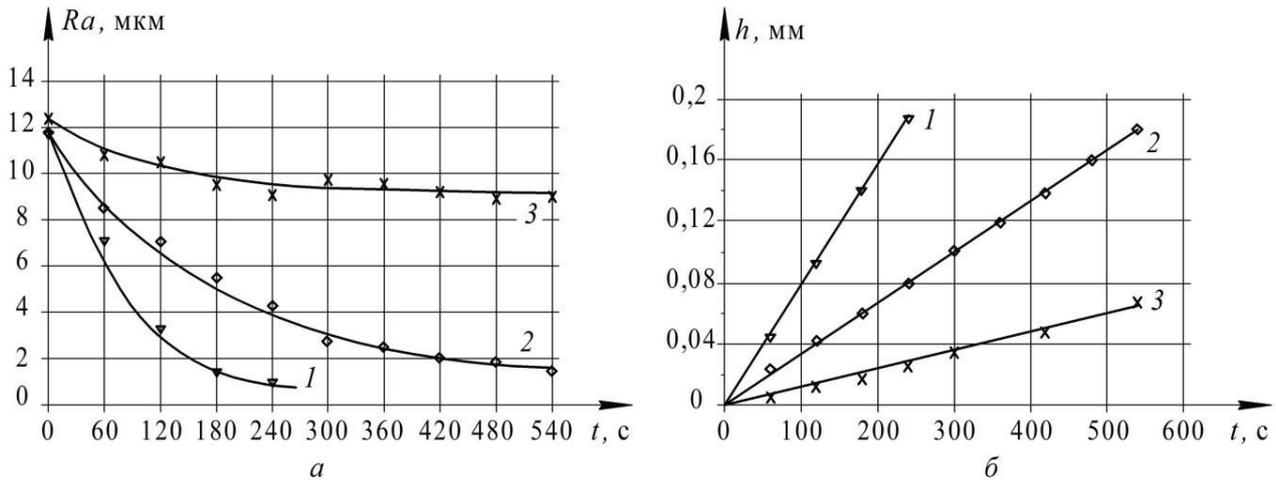


Рисунок 8. Зависимости шероховатости (а) и съема металла (б) от плотности тока в перхлоратном электролите на основе этиленгликоля: 1 - 4 А/см^2 ; 2 - 2 А/см^2 ; 3 - 1 А/см^2

Третья серия экспериментов проводилась в электролите: 100 г/л NaClO_4 в CH_3ON . В связи с тем, что данный электролит также обладает низкой электропроводностью, обработка образцов производилась при плотностях тока $i = 0,5 - 4 \text{ А/см}^2$ при концентрации 100 г/л NaClO_4 , скорости прокачки электролита $v = 1 \text{ м/с}$ и температуре $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$. Полученные зависимости представлены на рисунке 10.

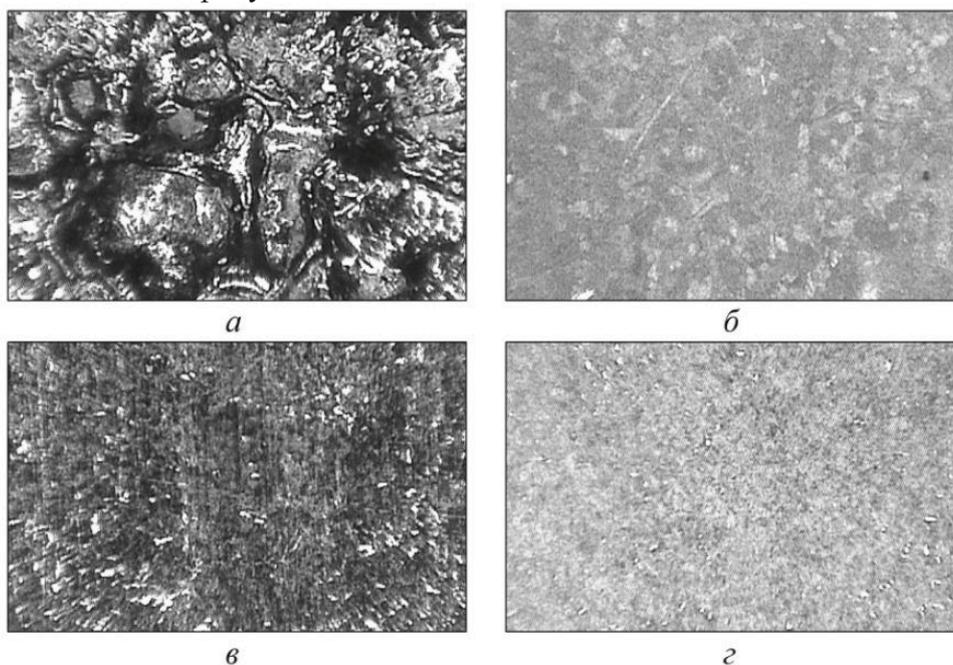


Рисунок 9. Изображения исходной поверхности (а), после обработки при плотности тока $i = 1 \text{ А/см}^2$ (б), после обработки при плотности тока $i = 2 \text{ А/см}^2$ (в), после обработки при плотности тока $i = 4 \text{ А/см}^2$ (г) в перхлоратном растворе на основе этиленгликоля (x100)

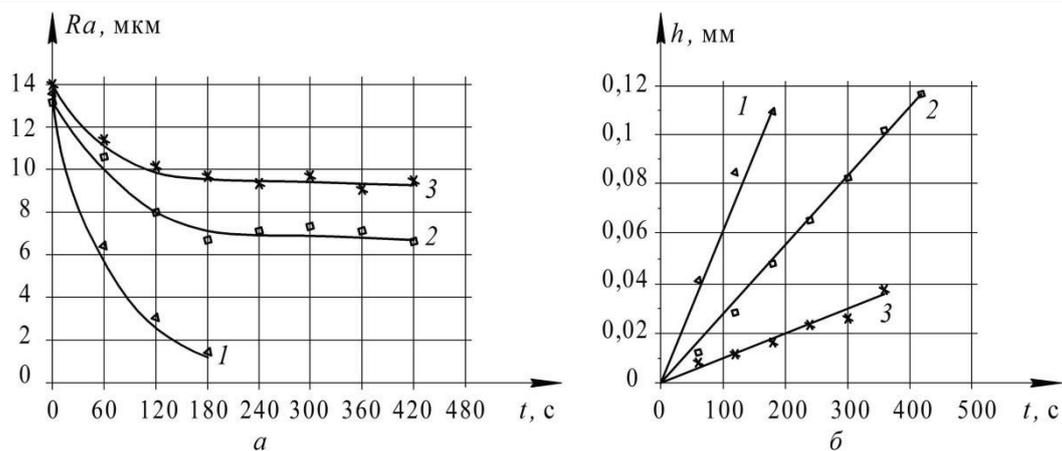


Рисунок 10. Зависимости шероховатости (а) и съема металла (б) от плотности тока в перхлоратном электролите на основе формамида: 1 - 4 А/см²; 2 - 2 А/см²; 3 - 1 А/см²

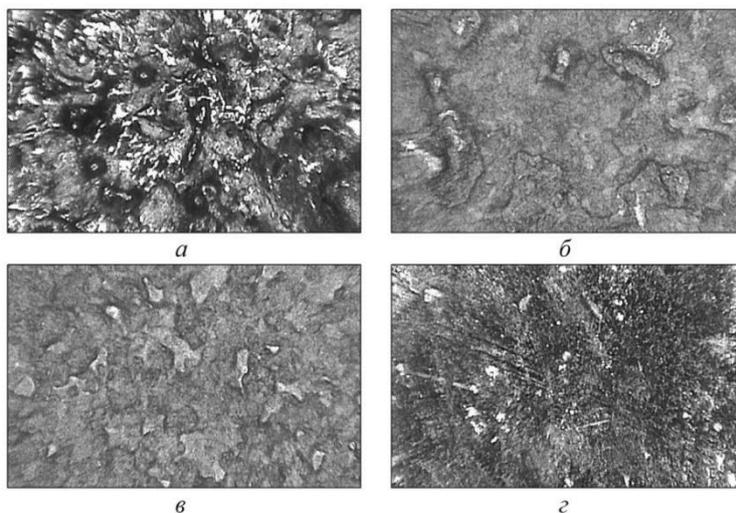


Рисунок 11. Изображения исходной поверхности (а), после обработки при плотности тока $i = 1$ А/см² (б), после обработки при плотности тока $i = 2$ А/см² (в), после обработки при плотности тока $i = 4$ А/см² (г) в перхлоратном растворе на основе формамида (x100)

При плотности тока $i = 1$ А/см² сначала происходил процесс выравнивания и съема, но при продолжении обработки качество поверхностного слоя улучшалось ненамного, достичь заданной шероховатости за указанный период обработки не удалось.

При плотности тока 2 А/см² так же как и при плотности 1 А/см², сначала происходил процесс выравнивания и съёма, но при продолжении обработки качество поверхностного слоя улучшалось ненамного, достичь заданной шероховатости за указанный период обработки не удалось. Морфология исходной и полученной поверхности при плотности тока 1, 2 и 4 А/см² представлены на рисунке 11.

При плотности тока 4 А/см² сначала происходил процесс съема и выравнивания шероховатости, получалась гладкая блестящая поверхность. Однако после 2 минуты обработки на поверхности стали появляться дефекты, а именно глубокие следы струйности и травления поверхности, заданных значений шероховатости за указанную период обработки также не удалось достичь, поэтому данный электролит для обработки сплава ЭП741-НП не подходит.

Выводы

Исходя из полученных результатов, сделаны следующие выводы:

1. После электроэрозионной операции требуется оставлять припуск под электрохимическую доводочную операцию.
2. В водных растворах солей удастся достичь заданных величин шероховатости поверхности, однако велика величина съема припуска: 0,273...0,378 мм.
3. В электролитах на основе органических растворителей на процесс обработки влияет

гидродинамика, которая особенно сильно видна после обработки в растворе формамида. Однако удалось достичь заданных величин шероховатости в растворе на основе этиленгликоля, при этом величина съема припуска: 0,179...0,188 мм.

4. Электролит на основе формамида не подходит для обработки сплава ЭП741-НП.

5. Для снятия дефектного слоя глубиной до 0,15 мм и снижения шероховатости поверхности с 5 мкм до 1 мкм (Ra) при электрохимической доводке изделий из сплава ЭП741-НП целесообразно использовать электролиты на основе органических растворителей с параметрами режима обработки: $v = 1$ м/с, $i = 4$ А/см², $T = 22$ °С.

Предлагаемый метод электрохимической доводки аэродинамических профилей лопаточных колес позволяет получать шероховатость $Ra = 0,8 \dots 1,0$ мкм, при минимальном съеме материала и снизить трудоемкость доводочной операции на 80...90% по сравнению с технологией, действующей на базовом предприятии. Полученная после обработки шероховатость и отсутствие дефектного слоя значительно увеличивают ресурс изделия и его КПД, что и определяет экономическую эффективность внедрения данной технологии на предприятиях аэрокосмической отрасли.

Литература

1. Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. Научно-технические технологии машиностроительного производства: Физико-химические методы и технологии: Учеб. пособие для высших технических учебных заведений / Под ред. проф. Б.П.Саушкина. – М.: Издательство «Форум», 2013. – 928 с.
2. Моргунов Ю.А., Саушкин Г.Б., Вилигданов Т.В. Электрохимическое гравирование аэродинамических занижений в оснастке с проточным каналом. «Металлообработка», 2010г., №2, с.70-75.
3. Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б. Структурное моделирование и классификация способов электрохимической размерной обработки. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2011, №1, 184-188с.
4. Моргунов Ю.А., Саушкин Г.Б. Теоретический анализ процесса электрохимического гравирования аэродинамических занижений. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2011, №1, 188-193с.
5. Ivan Rusica, Yurii Morgunov, Boris Saushkin, Ghenadii Saushkin, Ion Stingaci «Electrodischarge machining of surface microrecesses», Proceedings of the 16th International Conference Modern Technologies, «Quality and Innovation». Romany. Volume II. IASI- CHIȘINĂU-BELGRAD “ModTech 2012”, pp. 869 – 872.
6. Саушкин Б.П., Шандров Б.В., Моргунов Ю.А. Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2012, №2, стр.242...248.

Отработка технологии упрочнения поверхностей пар трения скольжения физико-химическим методом

к.т.н. проф. Шандров Б.В., д.т.н. доц. Филиппов В.В., Хомякова Н.В., Волков С.М.
 Университет машиностроения
 8(919)101-62-84, filkas@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы выбора состава нового электролита и назначения управляющих параметров микродугового оксидирования для упрочнения наружных цилиндрических поверхностей деталей из алюминиевого сплава.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамикоподобное покрытие, электролит, приращение размера, шероховатость, задиры поверхности

В настоящее время физико-химические методы широко используются в промышленности для упрочнения поверхностей деталей [1-4]. Микродуговое оксидирование (МДО), ха-