

УДК 621.9.047+621.453

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК МОНОКОЛЁС ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2013 С. А. Мозгов, Д. В. Панов, Б. П. Саушкин

Научно-производственное объединение «Техномаш», г. Москва

Рассмотрена проблема низкого качества поверхностей лопаток моноколёс после операции электроэрозии. Приведены рекомендации по подбору состава электролита и параметров режима обработки. Предложено использование специальной оснастки для реализации процесса электрохимической обработки поверхностей лопаток моноколёс.

Рабочие колёса турбин, качество поверхности, дефектный слой, электрохимическая обработка.

Турбонасосный агрегат (ТНА) является основным элементом жидкостного ракетного двигателя. Он осуществляет подачу компонентов топлива в камеру сгорания. Жёсткие условия работы и конструктивная сложность деталей ТНА предъявляют высокие требования к качеству их изготовления [1, 2].

Рабочие колёса турбин (рис. 1) эксплуатируются при высокотемпературных нагрузках и поэтому изготавливаются из жаропрочных материалов с низким коэффициентом обрабатываемости резанием [3]. Наибольшую сложность при изготовлении представляют монолитные колёса закрытого типа. Обработку лопаток таких колёс невозможно произвести традиционными способами из-за труднодоступности обрабатываемых поверхностей [4]. По этой причине широкое распространение получила операция электроэрозионной обработки (ЭЭО). Недостатками ЭЭО являются: низкая производительность, появление дефектного слоя глубиной 10-30 мкм и изнашивание электрода-инструмента в процессе обработки. Дефектный слой образуется в результате высокотемпературного воздействия и представляет материал с изменённой структурой, наличием трещин и остаточных напряжений.

На рис. 2 представлен сектор рабочего колеса двигателя после огневых испытаний, в процессе проведения которых произошло возгорание поверхностей лопаток.

Экспертный анализ установил причиной аварии низкое качество поверхностного слоя.



Рис. 1. Рабочие колёса ТНА ЖРД



Рис. 2. Сектор рабочего колеса турбины двигателя после испытаний

В настоящее время на предприятиях отечественной ракетно-космической промышленности крупногабаритные колёса доводят трудоёмким ручным способом. Малогабаритные колёса, как правило, не доводятся. В связи с этим данная проблема носит отраслевой характер и нуждается в решении.

Обобщая опыт экспериментальных работ по выбору способа отделочной обработки межлопаточных каналов моноколёс закрытого типа, можно заключить, что наиболее предпочтительным является способ электрохимической доводки, позволяющий гарантированно удалить дефектный слой и снизить шероховатость поверхности, при величине съёма припуска 10-60 мкм, в зависимости от параметров режима операции электроэрозии [5].

В разработке технологии электрохимической доводки межлопаточных каналов моноколес можно выявить два основных направления:

- научно-исследовательские работы по подбору состава рабочей жидкости – электролита и параметров режима электрохимической обработки заданного материала;
- опытно-конструкторские работы по созданию оснастки и оборудования для реализации процесса обработки.

Для проведения экспериментальных работ по подбору состава электролита и параметров режима обработки сплава ЭП-741НП спроектирована и изготовлена лабораторная установка (рис. 3).

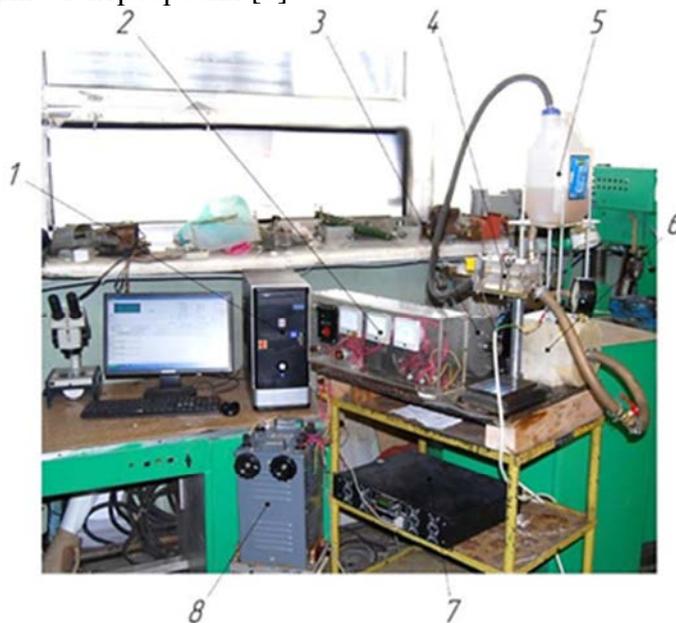


Рис. 3. Лабораторная установка для электрохимической обработки токопроводящих материалов:
1 – компьютер; 2 – пульт управления приводом насоса; 3 – привод насоса;
4 – экспериментальная ячейка; 5 – емкость с электролитом; 6 – насос;
7 – источник питания постоянного тока ЭЛИМ; 8 – автотрансформатор



Рис. 4. Образцы из сплава ЭП741-НП

Из исследуемого материала – ЭП741-НП изготовлены образцы (рис. 4), представляющие собой прутки размерами 55x10 мм, торцевая поверхность которых предварительно обрабатывалась электроэрозией. Шероховатость обработанной поверхности составила 10-14 мкм (Ra), толщина дефектного слоя достигала 30-50 мкм.

До и после электрохимической обработки образцы взвешивались на весах модели Ohaus PA214C с точностью до 10^{-4} г. По полученным данным определялась величина линейного съёма металла при заданных параметрах режима:

$$h = \frac{4(m_1 - m_2)}{\rho \pi d^2} \quad (1)$$

Плотность материала определялась по выражению

$$\rho = \frac{1}{\sum x_i / \rho_i} \quad (2)$$

где x_i – массовая доля элемента в сплаве; ρ_i – плотность компонента сплава.

Профилометром модели 130 («Протон-МИЭТ») замерялась шероховатость обработанной поверхности. Исследование

морфологии поверхности производилось на электронном микроскопе Falcon.

Первая серия экспериментов проводилась в водных растворах солей: NaCl и NaNO_3 при одинаковой удельной электропроводности χ . Исследовалось влияние на процесс выравнивания поверхности следующих параметров: плотность тока, скорость прокачки электролита, температура электролита, длительность процесса.

Наилучшие результаты получены в электролите состава 80 г/л NaCl (рис. 5).

При параметрах режима обработки $i=30$ А/см²; $v=8$ м/с; $T=22$ °С удалось снизить шероховатость поверхности с $Ra_{13,4}$ мкм до $Ra_{0,74}$ мкм за время 60 с при скорости съёма металла 0,231 мм/мин. Морфология исходной поверхности и поверхности образца, полученной после обработки при заданных режимах, представлена на рис. 6.

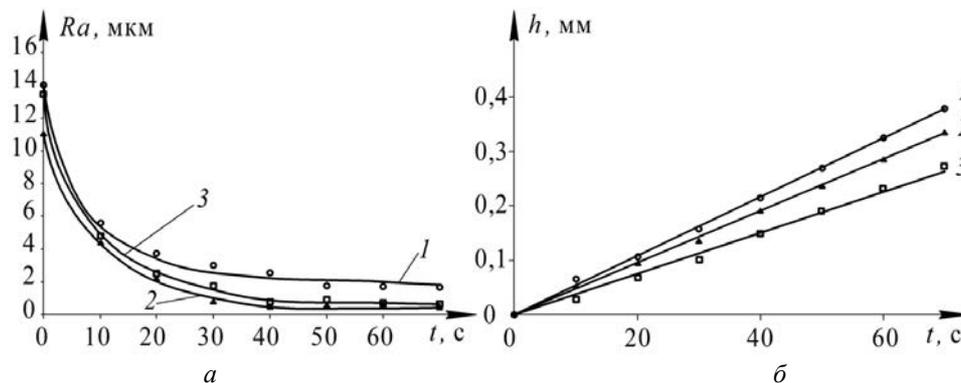


Рис. 5. Влияние состава электролита на процесс выравнивания шероховатости (а) и съём металла (б) в электролитах:

1 - 124 г/л NaNO_3 ; 2 - 60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO_3 ; 3 - 80 г/л NaCl

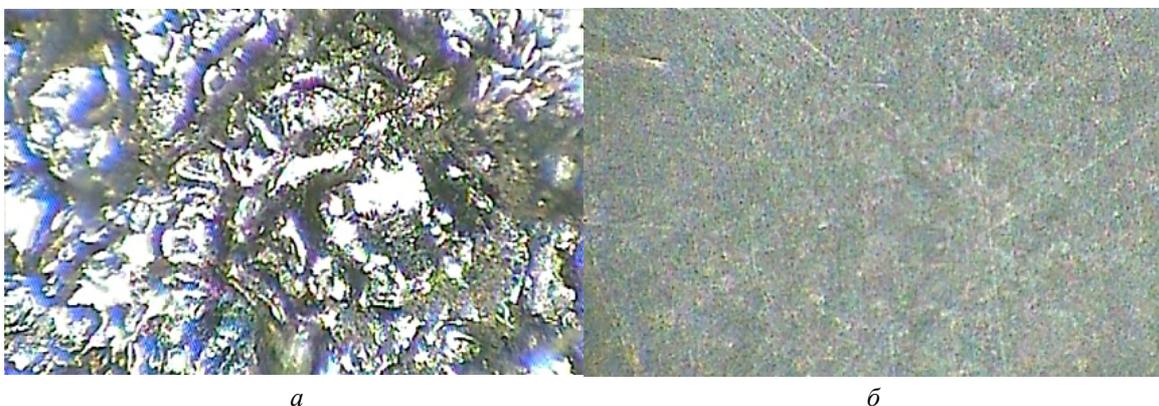


Рис. 6. Морфология поверхностей образцов ($\times 100$): до обработки ($Ra_{13,4}$ мкм) (а) и после обработки (б) ($Ra_{0,74}$ мкм) в электролите состава 80 г/л NaCl

Вторая серия экспериментов проводилась в органических перхлоратных электролитах на основе $C_2H_6O_2$, CH_3NO . Такие электролиты рекомендованы для отделочной обработки титановых и никель-хромовых сплавов в работах [6, 7].

В связи с тем, что данные электролиты обладают низкой электропроводностью, обработка образцов проводилась при плотностях тока 1-4 A/cm^2 .

В электролите состава 150 г/л $NaClO_4$ в $C_2H_6O_2$ при параметрах режима

обработки $i=4 A/cm^2$; $v=1 м/с$; $T=22 °C$ удалось снизить шероховатость с $Ra11,9 мкм$ до $Ra1 мкм$ за время 240 с при скорости съема металла 0,045 мм/мин (рис. 7). При этом на процесс обработки сильное влияние оказывает гидродинамика. В исследуемой области скоростей прокатки электролита (0,5-2 м/с) на поверхностях образцов наблюдаются следы струйности.

Морфология исходной и полученной поверхности при плотности тока 4 A/cm^2 представлена на рис. 8.

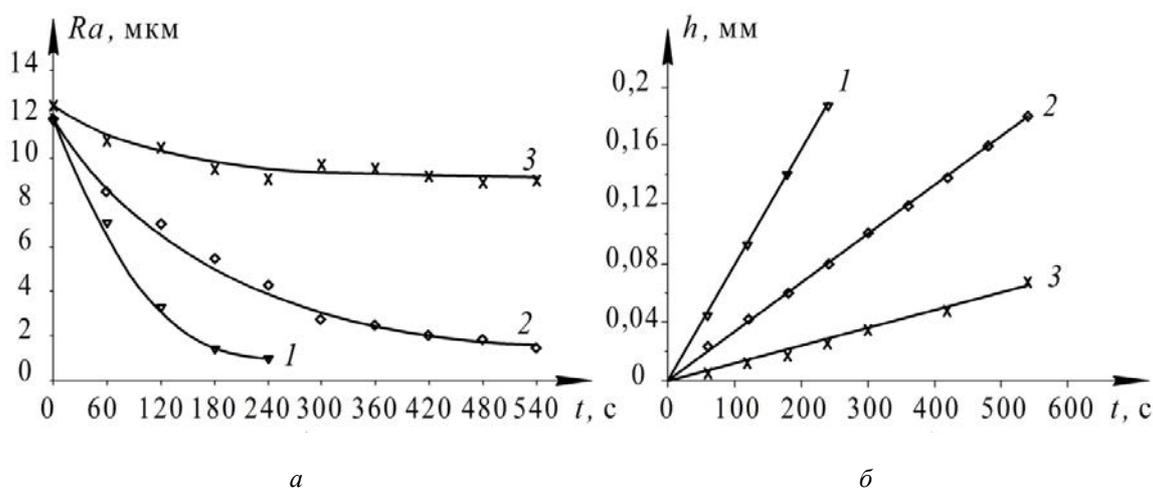


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности (а) и съема металла (б) от плотности тока: 1 - 4 A/cm^2 ; 2 - 2 A/cm^2 ; 3 - 1 A/cm^2

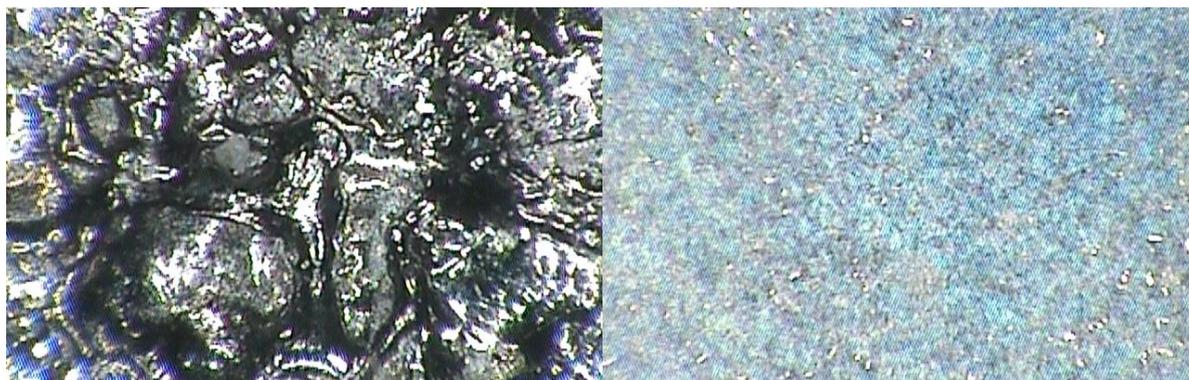


Рис. 8. Морфология поверхностей образцов ($\times 100$): до обработки ($Ra 11,9 мкм$) (а) и после обработки (б) ($Ra 1 мкм$) в электролите состава 150 г/л $NaClO_4$ в $C_2H_6O_2$ (б)

Исходя из полученных результатов, сделаны следующие выводы:

1. В водных растворах солей удаётся достичь заданных величин шероховатости поверхности, однако велика скорость съёма припуска – 0,2-0,4 мм/мин.

2. В электролитах на основе органических растворителей на процессе обработки сказываются гидродинамика и плотность тока, при этом величина скорости съёма припуска составляет 0,002-0,007 мм/мин.

3. Для снятия дефектного слоя глубиной до 0,1...0,2 мм и снижения шероховатости поверхности с 12 мкм до 1 мкм (Ra) при обработке изделий из сплава

ЭП741-НП целесообразно использовать электролиты на основе органических растворителей.

Малый радиус кривизны спинки и корыта лопаток, наличие бандажного колеса конструктивно затрудняют доступ в межлопаточный канал и требуют разработки специальной высокоточной оснастки для реализации процесса электрохимической доводки.

Для достижения заданных параметров точности и качества поверхности предложено использовать приспособление для электрохимической доводки лопаток моноколёс закрытого типа, представленное на рис. 9.

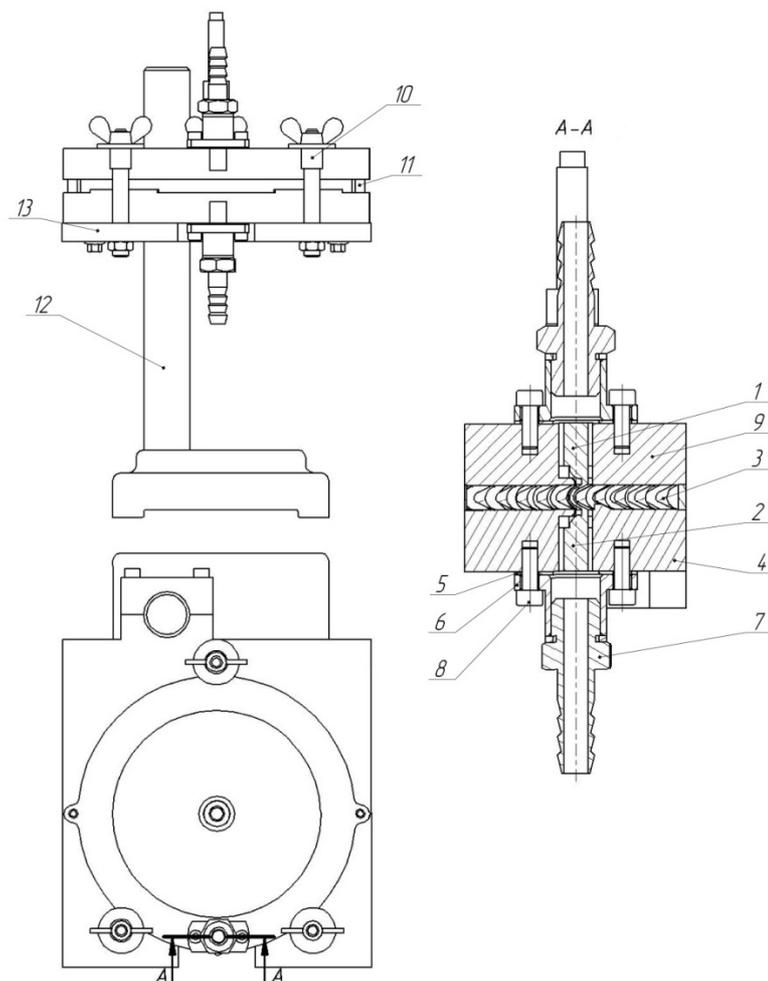


Рис. 9. Приспособление для электрохимической доводки лопаток рабочих колес турбин закрытого типа:

1,2 – профильные электроды; 3- моноколесо; 4 – изолятор нижний; 5 – прокладка; 6 – фланец; 7 – штуцер; 8 – винт; 9 – изолятор верхний; 10 – зажим; 11 – ориентирующий штифт; 12 – стойка

В конструкции приспособления использованы два профильных электрода 1 и 2, гарантирующие равномерный съём припуска с поверхностей лопаток. Кроме того, решена задача ориентации турбины. Совпадение осей моноколеса и изоляторов осуществляется выступами нижнего изолятора 4 и штифтами 11. Угловое положение выдерживается профильным ориентирующим выступом нижнего изолятора, вводимым в необрабатываемый межлопаточный канал.

Конструкция приспособления позволяет обработать за один установ заготовки один межлопаточный канал. Оперативное время на обработку одного канала составляет около 10 мин. Учитывая значительное количество каналов (50-100), суммарное оперативное время на обработку всех межлопаточных каналов составит около 500-1000 мин. Однако, поскольку лимитирующей операцией в технологическом процессе изготовления рабочего колеса является электроэрозионное формообразование лопаток с оперативным временем более 5000 мин, данная конструктивная особенность не повлияет на такт выпуска изделий.

Анализ показал, что использование многоэлектродной оснастки значительно усложняет её конструкцию и экономически не оправдано.

Максимальное снижение трудоёмкости на операции электрохимической доводки возможно при использовании системы с ЧПУ, включающей шаговый двигатель для поворота заготовки на заданный угол и два профильных электрода, вводимых в межлопаточный канал по заданной траектории манипуляторами с одновременной герметизацией зоны обработки.

Таким образом, предлагаемая технология доводки поверхностей лопаток рабочих колес позволяет гарантированно удалить дефектный слой после операции электроэрозии и снизить шероховатость поверхности до Ra 0,4...0,8 мкм, при минимальном съёме материала (15-60 мкм).

Высокое качество полученных поверхностей позволит увеличить ресурс изделия и КПД ТНА, что определяет экономическую эффективность внедрения данной технологии на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Библиографический список

1. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей [Текст]/ под. ред. А.Г. Братухина, Г.К. Язова, Б.Е. Карасева. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.
2. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей [Текст] / А.Г. Бойцов, А.П. Ковалев, А.С. Новиков [и др.] – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 584 с.
3. Повышение эффективности изготовления лопаток моноколес [Текст] / Ю.П. Астахов, С.А. Кочергин, Ю.А. Моргунов [и др.] // Технология машиностроения. –2013. – №5. – С. 14-18.
4. Научно-технические технологии производства РКТ [Текст] / под ред. В.В. Булавкина, В.Х. Постаногова, Ю.Ф. Назарова. – Подольск: Сатурн-С, 2001. – 365 с.
5. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие / под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.
6. Саушкин, Б.П. Электрохимическая отделочная обработка материалов [Текст] / Б.П. Саушкин // Металлообработка. –2001. – №1. – С. 27-30.
7. Исследование процесса электрохимического удаления дефектного слоя с заготовок лопаток ГТД [Текст]: сб. тр. «Прогрессивные технологические методы в машиностроении» / П.Я. Косенко, А.В. Маслов, А.З. Нистрян [и др.] под ред. Б.П. Саушкина. – Кишинев: Штиинца, 1991. – С. 56-66.

IMPROVEMENT OF THE QUALITY OF THE SURFACES OF MONOWHEEL BLADES OF LIQUID ROCKET ENGINE TURBOPUMP ASSEMBLIES

© 2013 S. A. Mozgov, D. V. Panov, B. P. Saushkin

Federal State Unitary Enterprise Scientific-and-Industrial
Association Technomash, Moscow

Considered the problem of poor quality of blade surfaces monowheels after the electroerosion. The recommendations on selection of electrolyte composition and parameters of the treatment regime. Proposed the use of special equipment to implement the process of electrochemical surface treatment of blades monowheels.

Working turbine wheels, surface quality, defect layer, electrochemical machining.

Информация об авторах

Мозгов Станислав Андреевич, инженер-технолог первой категории, Научно-производственное объединение «Техномаш», г. Москва. E-mail: CAMozg@yandex.ru. Область научных интересов: разработка технологий электрохимической обработки изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Панов Дмитрий Витальевич, кандидат юридических наук, генеральный директор, Научно-производственное объединение «Техномаш», г. Москва. E-mail: info@tmnpo.ru. Область научных интересов: совершенствование технологий производства изделий ракетно-космической техники.

Саушкин Борис Петрович, доктор технических наук, начальник отделения «Физико-химических и вакуумных технологий», Научно-производственное объединение «Техномаш», г. Москва. E-mail: sbp47@mail.ru. Область научных интересов: физико-химические и комбинированные методы обработки изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Mozgov Stanislav Andreevich, post-graduate, processing engineer, Federal State Unitary Enterprise Scientific-and-Industrial Association Technomash, Moscow. E-mail: CAMozg@yandex.ru. Area of research: development of technologies for electrochemical treatment of products of aviation and space technology.

Panov Dmitry Vitalievich, candidate of Law, director general of the "Federal State Unitary Enterprise" Scientific-and-Production Association "Technomash", Moscow. E-mail: info@tmnpo.ru. Area of research: improving the technology of manufacture of products of rocket and space technology.

Saushkin Boris Petrovich, doctor of technical science, chief of department «Physical-chemical and vacuum technology», Federal State Unitary Enterprise Scientific-and-Industrial Association Technomash, Moscow. E-mail: sbp47@mail.ru. Area of research: physico-chemical and combined methods of treatment of products aviation and space technology.