

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕРА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

Д. И. Кононов¹, Л. А. Таймасова², Р. Т. Сафиуллин³, С. Н. Бухта⁴

¹Ya.1dim@yandex.ru, ²lagalimova@yandex.ru, ³Skorpion356@mail.ru, ⁴bsn525@mail.ru

^{1,2} НПА «Технопарк Авиационных Технологий» (НПА «Технопарк АТ»)

³ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

^{3,4} ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО»)

Поступила в редакцию 15.10.2021

Аннотация. Определены проблемы традиционных методов обработки пера лопаток, таких как фрезерование, шлифование. Проведены исследования электрохимической обработки лопаток, оценены технологические возможности применения двусторонней электрохимической обработки в условиях серийного производства на современном оборудовании. Проведены исследования методов доводки профиля электрода-инструмента с целью получения годного профиля пера лопатки. Предложена технология изготовления электродов-инструментов, обеспечивающая точность и повторяемость результатов обработки за счет применения современных фрезерных станков с ЧПУ и измерительных систем.

Ключевые слова: электрохимическая обработка; электрод-инструмент; электролит; лопатки компрессора.

Одними из ответственных и наиболее массовых деталей газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопатки компрессора высокого давления (КВД), изготовление которых занимает особое место в производстве. Это обусловлено высокими требованиями к геометрической точности, качеству поверхностного слоя, усталостной прочности.

В современном авиадвигателестроении активно внедряют тонкостенные сложнопрофильные лопатки 1 класса точности по ОСТ 1 02571-86 из жаропрочных сталей и титановых сплавов, отклонения координат точек аэродинамического профиля пера которых от 0,06 мм [1, 2].

Традиционные методы обработки таких деталей (фрезерование, шлифование) не позволяют обеспечить высокую производительность и имеют высокий износ инструмента. Вальцевание позволяет обрабатывать ограниченную номенклатуру изделий и требует больших капиталовложений в освоение технологии. Также базовые техпроцессы содержат большое количество операций с применением ручного труда, что является экономически нецелесообразным и технологически трудно реализуемым для указанного типа высокоточных деталей, что приводит к значительной доли брака.

Применение электрохимической обработки (ЭХО) повышает производительность обработки, при этом обеспечивает требуемые механические свойства за счет отсутствия прижогов, микротрещин и остаточных напряжений от механической обработки. При этом ЭХО характеризуется недостаточной точностью на существующем оборудовании и технологическом оснащении [3].

Актуальность работы заключается в необходимости высокопроизводительного изготовления лопаток компрессора ГТД 1 класса точности, с повышенным качеством поверхностного слоя и эксплуатационными характеристиками. Для реализации поставленной задачи необ-

ходимо разработать способ доработки профиля электродов-инструментов для формообразования трактовой поверхности профиля пера лопаток.

Для обработки лопаток с точностью по профилю пера 0,06 мм требуется получить рабочий профиль электрода [5] с учетом особенностей гидродинамических процессов течения электролита в межэлектродном зазоре (МЭЗ), распределения плотности тока вдоль обрабатываемой детали, разности скоростей травления детали на кромках, в центральной и прикомлевой зоне пера, а также учесть разность припусков на заготовке в зоне обработки. С учетом указанных особенностей, допуск на формообразующие поверхности электрод-инструмента не более 0,01 мм.

Оценить влияние вышеизложенных факторов на процесс формообразования профиля пера лопаток возможно путем обработки опытной партии лопаток (3...5 шт.). Необходимым условием для начала работ по доработке профиля электрода является наличие высокой повторяемости воспроизведения обработанного профиля пера лопатки методом ЭХО, что предполагает завершение работ по настройке технологического оснащения и отладке технологических режимов обработки. Профиль электрода при этом предварительно обработан на фрезерном станке с числовым программным управлением (ЧПУ).

Контроль профиля пера лопаток по сечениям производится на координатно-измерительных машинах типа GLOBAL, ZEISS, лазерной измерительной машине типа BLAZER и т.д. или по всему профилю пера на оптической измерительной машине типа ATOS.

Доработку профилирующей части электродов-инструментов производят, исходя из результатов измерений обработанной детали. После каждой коррекции профиля электродов проводится обработка партии лопаток (1...3 шт.) и измерение профиля лопаток для учета изменений в условиях обработки детали. Величина коррекции составляет от 30 до 70 % от величины отклонения профиля измеренной детали от математической модели с учетом достигнутого параметра повторяемости профиля.

При проведении исследований не учитывались погрешности, связанные с точностью установки детали в оснастку, и точностью изготовления базовых поверхностей заготовки. Подобное допущение возможно при условии, что отклонение профиля от математической модели ввиду неоднозначности установки в технологической оснастке не превышает допустимых значений на разворот, наклон и смещение профиля относительно базовых поверхностей детали. Применение данного метода направлено на повышение точности изготовления профиля с точки зрения требований, предъявляемых к геометрическим параметрам сечений (рис. 1), таких как S_{max} , $C1$, $C2$, допуск на отклонение координат точек профиля детали в контрольных сечениях.

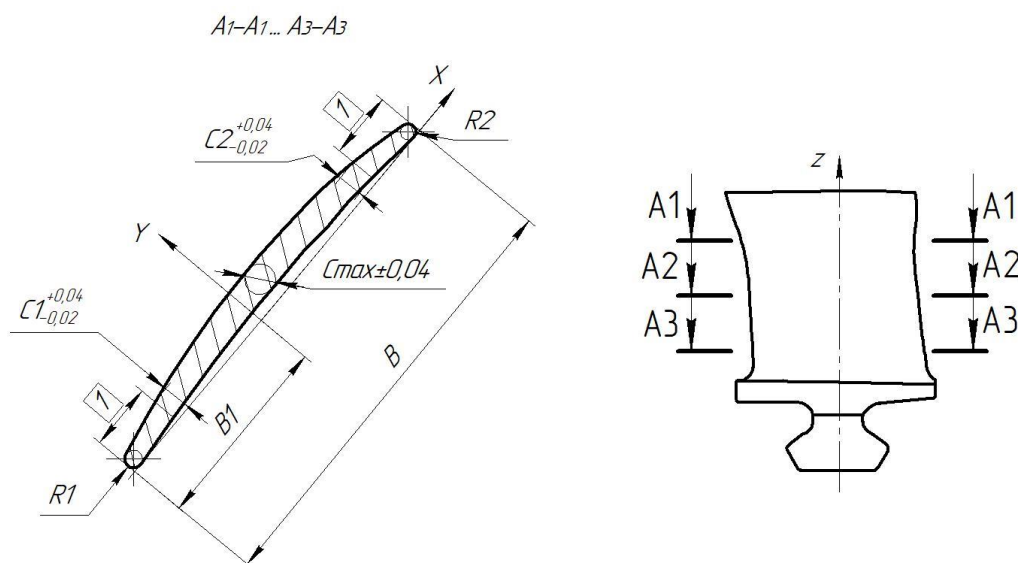


Рис. 1. Геометрические параметры профиля пера

Естественным ограничением для реализации метода является точность измерения на применяемом контрольном оборудовании и достигнутое качество воспроизведения (повторяемость) аэродинамического профиля лопатки на станке.

Существуют следующие способы коррекции электрода-инструмента [5]:

- 1) ручное шлифование/полирование зон электрода, расположенных напротив участков профиля пера с наличием провалов относительно модели;
- 2) сварка, напыление, гальваническое осаждение в зонах, расположенных напротив участков профиля пера с выступанием относительно модели;
- 3) повторная обработка рабочего профиля электрода на фрезерном станке, при этом изменения вносятся в 3D-модель детали, по которой формируется управляющая программа обработки станка.

В некоторых случаях возникает необходимость изменения зон электрода, формирующих вход и выход электролита, с целью исключения струйности, застойных зон и вихревых эффектов в МЭЗ. Целью изменений также может быть уменьшение припуска под последующую обработку кромок (исполнение размеров В и В1), либо увеличение припуска по кромкам для улучшения условий формирования кромочной зоны пера (исполнение размеров С1 и С2).

Коррекция профиля электродов с применением ручного шлифования и полирования не требует специального оборудования, сложных приспособлений, достаточно наличие гравера с набором шлифовальных/полировочных насадок и полировочных паст, но необходима высокая квалификация рабочего-полировщика. Однако для обеспечения точности изготовления электродов-инструментов, необходимых для формирования профиля пера лопаток 1 класса точности, данный метод практически неприменим.

Коррекция профиля электрода наращиванием сопряжена с высокой трудоемкостью, сложностью работ, необходимостью последующего шлифования и полирования профиля. При дальнейшем применении электрода возможно отслоение и появление сколов нарощенного тела, а также коррозия металла в электролите из-за образования гальванической пары из разнородных материалов. Применение данного способа не рекомендуется.

Наиболее технологичным является метод коррекции профиля электрода-инструмента путем повторной обработки на фрезерном станке по 3D-модели (с внесением изменений в 3D-модель детали). При его применении возможно добиться высокой точности формообразующих поверхностей электрода. Недостатками применения данного метода являются сложность коррекции 3D-модели и увеличение времени, необходимого для обработки электрода с момента проведения измерений обработанной детали, что зачастую сопряжено с высокой загрузкой высокоточных фрезерных станков с ЧПУ.

С учетом вышеизложенных недостатков коррекции профиля электродов фрезерованием с внесением изменений в 3D-модель, в качестве первоначального опытного варианта отработки технологии, выполнена доводка электродов с применением шлифования и полирования, также применялась электродуговая сварка для изменения поверхностей, отвечающих за формирование полки и кромок на лопатке.

Задачами исследования являются:

- оценка технологических возможностей применения двусторонней электрохимической обработки в условиях серийного производства на современном оборудовании;
- исследование методов доводки профиля электрода-инструмента с целью получения годного профиля пера лопатки.

В качестве объектов производства были выбраны лопатки КВД ГТД из титанового сплава ВТ6 и ВТ8, допуск по профилю размер $C_{max}^{+0,04}_{-0,04}$, $C_1^{+0,04}_{-0,02}$, $C_2^{+0,04}_{-0,02}$ мм. Математические 3D-модели деталей были разработаны в программных средах SolidWorks и Компас-3D. Для отработки технологии применялся электрохимический станок «Искра-ЛТ» (рис. 2) производства компании АО ИНТЦ «Искра», г. Уфа.



Рис. 2. Электрохимический станок «Искра-ЛТ»

Оборудование обладает согласованной вибрацией электрод-инструмента [3] и подачей импульсов технологического тока, позволяет осуществлять обработку при минимально возможном значении межэлектродного зазора, за счет чего достигается необходимая избирательность процесса. В паузах между импульсами обработки металла не происходит, в это время снятый материал, находящийся в виде шлама, смывается потоком электролита.

Способ обладает технологическими преимуществами перед традиционным способом ЭХО на постоянном токе: интенсивная эвакуация продуктов электрохимических реакций вследствие возникновения поршневого эффекта при вибрации электрода, возможность безопасной работы на малых МЭЗ порядка 20...100 мкм при высоких плотностях тока [4]. Все это позволяет улучшить избирательность процесса обработки и точность копирования, увеличить производительность и снизить шероховатость поверхности вследствие высокой локализации процесса и достижения значительных плотностей тока.

Измерение профиля пера обработанных методом ЭХО лопаток производились на оптической измерительной машине типа ATOS (рис. 3).

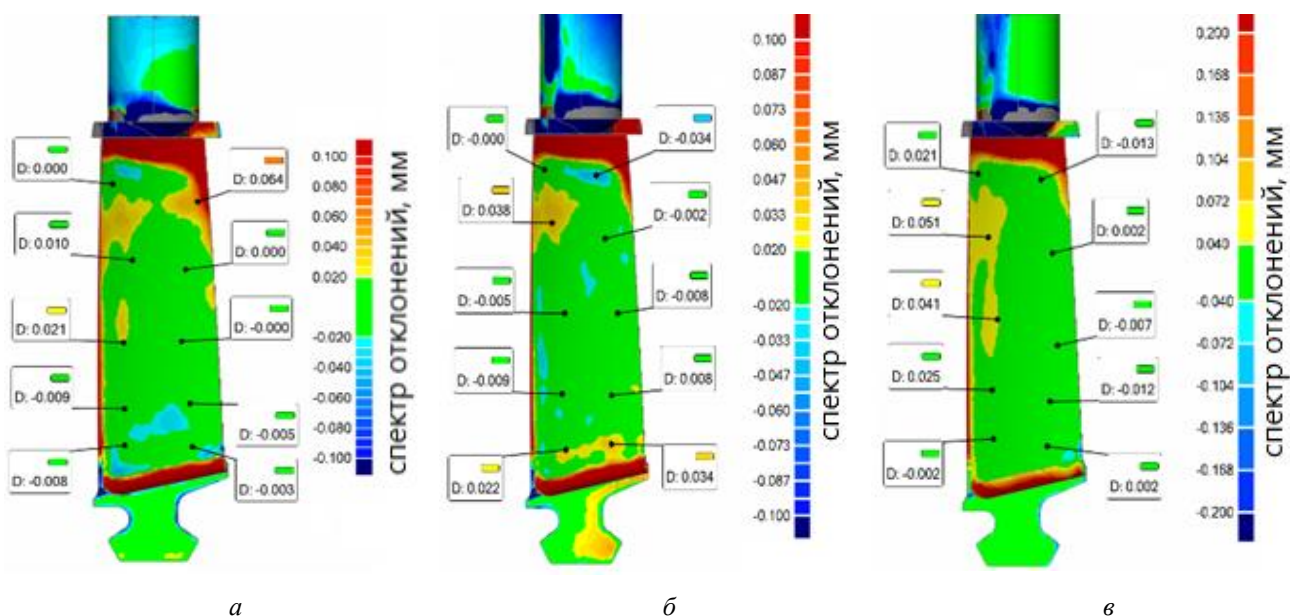


Рис. 3. Результаты сравнения профиля пера лопаток с математической моделью:
а – лопатка № 1; б – лопатка № 2; в – лопатка № 3

На рис. 3 представлены результаты сравнения трех обработанных методом ЭХО лопаток с математической моделью. Наблюдается высокая точность воспроизведения профиля электрода-инструмента на деталях. Характер отклонений профиля свидетельствует о высокой повторяемости, при этом достигнута точность обработки 0,04 мм на 95 % площади пера. Зоны отклонения сверх допуска составляют не более 0,02 мм.

Для оценки повторяемости обработки также было произведено совмещение двух измеренных на ATOS лопаток относительно друг друга. Совмещение производилось по профилю пера с математической моделью (рис. 4).

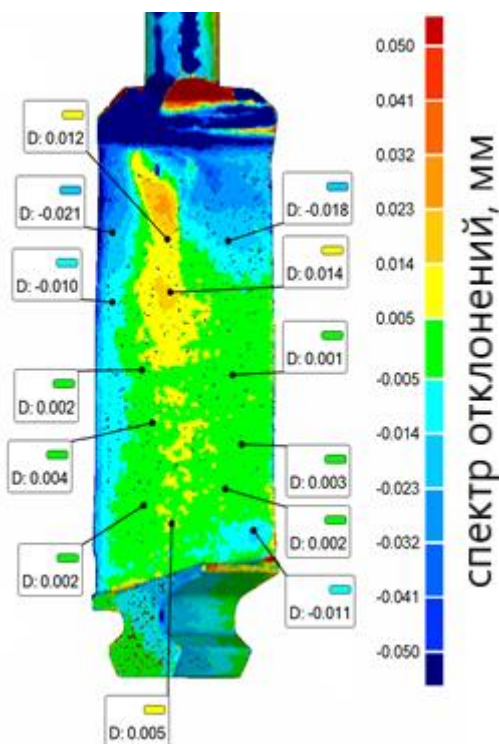


Рис. 4. Результат наложения измерений профиля двух лопаток между собой

Для оценки повторяемости воспроизведения профиля без учета погрешностей установки детали в технологическую оснастку на рис. 4 представлены результаты наложения измерений профиля двух лопаток между собой, одна из лопаток выбрана в качестве эталона. В результате сравнений повторяемость составила 0,015 мм, что говорит о возможности серийного производства лопаток КВД 1 класса точности методом ЭХО. Отклонения по замковой части указывают на погрешности, связанные с установкой детали в технологической оснастке, погрешности в изготовлении базовых поверхностей технологического оснащения и обрабатываемой детали. Снижение указанных погрешностей возможно при повышении качества изготовления технологического оснащения и изменении системы базирования детали.

Для проведения работ применялись два вида заготовок:

- 1) полученные по серийной технологии с предварительно обработанным замком;
- 2) проведены опытные работы по обработке партии лопаток с плоскими базами, в результате обработки улучшены результаты в повторяемости воспроизводимого профиля пера за счет сокращения погрешности базирования лопаток в приспособлениях для ЭХО, значительно снижено время для отработки технологии ЭХО. Однако данный вариант требует коренного изменения технологического процесса изготовления лопаток.

Изготовление электродов-инструментов для электрохимической обработки пера лопаток из всех применяемых видов заготовок проводилось по следующей технологии:

1. Предварительное фрезерование профиля электрода на станке с ЧПУ с последующим механическим полированием.
2. Электрохимическая обработка детали.

3. Измерение обработанных лопаток в количестве 3...5 шт., выявление зон с отклонением профиля сверх допуска.

4. Коррекция формообразующей поверхности электрод-инструмента, с целью уменьшения величины отклонения профиля при последующей обработке лопаток в выявленных зонах.

Пункты 2, 3 и 4 повторяются до получения детали в соответствии с требованием контрольной карты на операцию.

5. После получения годной лопатки произведены измерения электрод-инструмента и изготовление новой математической 3D-модели электрода. На данном этапе были исправлены мелкие дефекты поверхности, полученные в результате применения ручных методов обработки.

6. По полученной модели был изготовлен новый электрод-инструмент и произведена повторная обработка партии деталей.

Результаты сравнения лопатки до и после доводки электродов-инструментов представлены на рис. 5.

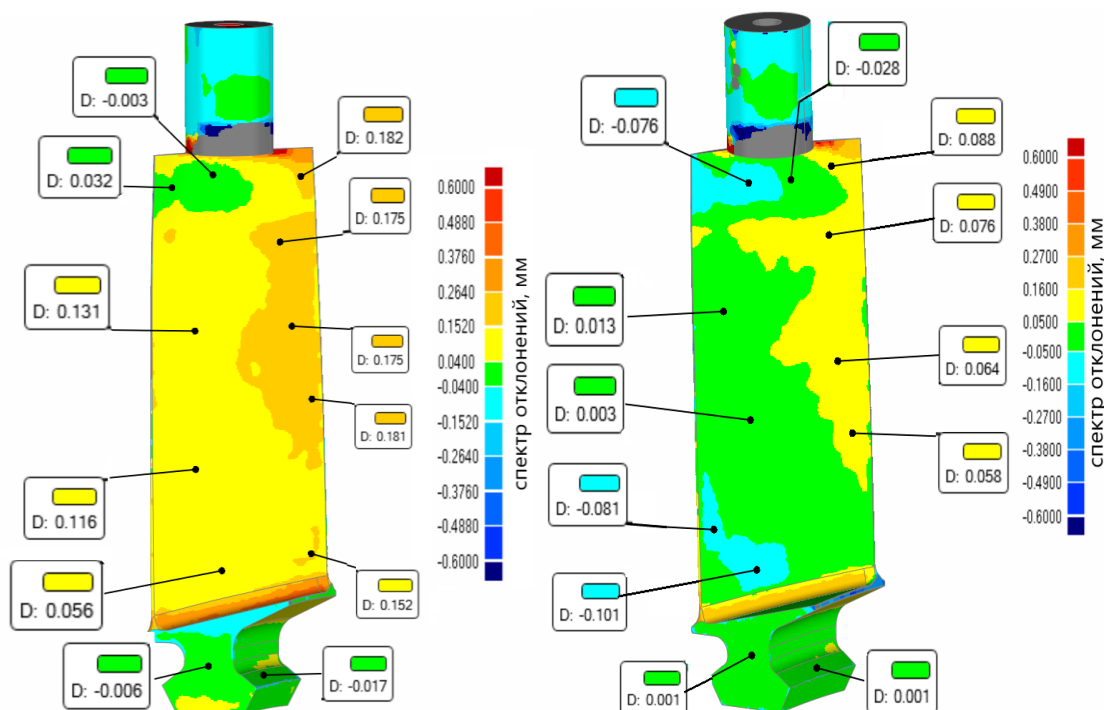


Рис. 5. Результат сравнения лопатки до и после доводки электродов-инструментов

По результатам замеров обработанной партии было принято решение о завершении работ по доводке профиля, отправке лопаток на дальнейшие технологические операции и усталостные испытания.

Применение электрохимической обработки обеспечивает высокую скорость съема материала, за счет чего повышается производительность и экономическая эффективность от внедрения процесса обработки пера компрессорных лопаток на станке «Искра-ЛТ» в сравнении с фрезерованием с ЧПУ на станке 500VB.

Общие затраты на инструмент [6], включая затраты на заработную плату, на силовую и электроэнергию, на электролит, амортизацию и на текущий, средний и капитальный ремонт оборудования для изготовления одного моторокомплекта в год при условии 3-х сменной загрузки, коэффициент сменности 0,75 были вычислены по формуле (1):

$$O_3 = Z_{\Pi} + Z_{Э} + I + Z_{и} + A_0 + P_0. \quad (1)$$

Таким образом, общие затраты при фрезеровании на станке с ЧПУ составили 7,3 млн руб., при двусторонней ЭХО – 4,2 млн руб.

Годовая экономия от внедрения электрохимического станка [6] рассчитана по формуле (2):

$$\mathcal{E}_Г = (O_{з(ид)5} - O_{з(ид)4}) \cdot Д \quad (2)$$

и составляет 11,6 млн руб. на этапе отработки технологии и 17,9 млн руб. – при отработанной технологии.

Срок окупаемости оборудования [6] определен исходя из стоимости оборудования (C_0), годовой экономии ($\mathcal{E}_Г$), амортизации оборудования (A_0), по формуле (3):

$$C_{ок} = \frac{C_0}{K_{нп} \cdot \mathcal{E}_Г + A_0} \quad (3)$$

и составляет 3,49 года на этапе отработки технологии и 2,58 года – при отработке технологии.

ВЫВОДЫ

В ходе проведения работ было обработано два моторокомплекта лопаток (более 150 шт.). Детали, обработанные по профилю пера и технологической полке в соответствии с операционной картой на электрохимическую обработку. Обработанная партия лопаток по результатам проверки на геометрическую точность и испытаниям на усталостную прочность признаны годными.

Достигнута точность обработки лопатки в 0,05 мм с повторяемостью между лопатками до 0,02 мм, без учета погрешности базирования детали в технологическом оснащении.

Анализ существующих методов доводки электродов-инструментов таких как наварка, ручное полирование и электрохимическая обработка обратной полярностью показал, что указанные методы не позволяют достигнуть требуемой точности профиля электрода в виду наличия большого количества погрешностей, связанных с применением ручного труда и переустановкой обрабатываемой детали (электрода-инструмента). Предложенная технология доводки электрода-инструмента позволила устранить недостатки существующих методов доводки за счет применения современных фрезерных станков с ЧПУ и измерительных систем, а также получить высокую точность формообразующих поверхностей электрода.

Производительность ЭХО в сравнении с фрезерованием в 4,3 раза выше при существующей производительности ЭХО. Годовая экономия от внедрения ЭХО в сравнении с фрезерованием с ЧПУ составит от 11,6 до 17,9 млн руб. на 1 станок в год при условии полной загрузки станков. Срок полной окупаемости составит 3,49 года на этапе отработки технологии и 2,58 года – при отработанной технологии. При переходе от фрезерования на ЭХО лопаток суммарные затраты на инструмент сокращаются в 1,7 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байсупов И. А., Волосатов В. А. Справочник молодого рабочего по электрохимической обработке. М.: Высшая школа, 1983. 175 с.: ил. [I. A. Baysupov, V. A. Volosatov, *Handbook of a young worker on electrochemical processing*, (in Russian). Moscow: Vysshaya shkola, 1983.]
2. Фаткуллина Д. З., Галиев В. Э. Перспективный технологический процесс изготовления прецизионных компрессорных лопаток // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 3 (64). С. 97–105. [D. Z. Fatkullina, V. E. Galiev, "Problems and perspectives of manufacturing precision compressor blades", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 18, no. 3 (64), pp. 97-105, 2014.]
3. Идрисов Т. Р., Маннапов А. Р., Смирнов М. С. Технология импульсной электрохимической обработки вибрирующим электродом-инструментом. Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины. Уфа: УГАТУ, 2011. 30 с. [T. R. Idrisov, A. R. Mannapov, M. S. Smirnov, *Technology of pulsed electrochemical processing with a vibrating electrode tool. Study guide for the study of the discipline*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2011.]
4. Морозов Б. И. Способ электрохимической обработки вибрирующим катодом // Патент СССР № 260787. Опубл. 06.01.1970. Бюл. № 4. [B. I. Morozov, "The method of electrochemical machining vibrating cathode", Patent USSR 260787, 1970.]
5. Каримов А. Х. Расчет и профилирование инструмента для электрохимического формообразования поверхностей деталей. Казань: КАИ, 2005. 36 с. [A. Kh. Karimov, *Calculation and profiling of tools for electrochemical shaping of surfaces of parts*, (in Russian). Kazan: KAI, 2005.]
6. Еленева Ю. А. Экономика машиностроительного производства. М.: Академия, 2016. 297 с. [Yu. A. Yeleneva, *Economics of machine-building production*, (in Russian). Moscow: Academia, 2016.]

ОБ АВТОРАХ

КОНОНОВ Дмитрий Иванович, нач. констр.-техн. сектора отд. электротехнологий НПА «Технопарк АТ». Дипл. спец. тех. маш. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. электрофизико-хим. мет. обр.

ТАЙМАСОВА Лилия Альбертовна, вед. инж.-техн. НПА «Технопарк АТ». Дипл. спец. тех. маш. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. электрофизико-хим. мет. обр.

САФИУЛЛИН Ринат Тагирович, нач. уч. ПАО «ОДК-УМПО». Проф. каф. СЛАТ. Дипл. бакалавр электон. (БГУ, 2016). Иссл. в обл. электрофизико-хим. мет. обр.

БУХТА Станислав Николаевич, дипл. спец. техн. литейн. произв-ва (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. электрофизико-хим. мет. обр.

METADATA

Title: On ensuring the quality of electrochemical treatment the feathers of the blades of a compressor GTE.

Authors: D. I. Kononov¹, L. A. Taymasova², R. T. Safiullin³, S. N. Buhta⁴

Affiliation:

^{1,2} Scientific Production Association "Technological park of aviation technologies" (SPA "Technopark AT"), Russia,

³ Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia,

³ Public joint stock company «United Engine Corporation – Ufa Engine-Building Production Association» (PJSC «UEC-UEBPA»), Russia.

Email: ¹Ya.1dim@yandex.ru, ²lagalimova@yandex.ru, ³Skorpion356@mail.ru, ⁴bsn525@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 61-68, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The problems of traditional methods have been identified and studies have been carried out on the electro-chemical treatment of the blade airfoil. A technology for the manufacture of electrodes tools is proposed, which ensures the accuracy and repeatability of the processing results.

Key words: electrochemical treatment; electrode tool; electrolyte; compressor blades.

About authors:

KONONOV, Dmitry Ivanovich, head of design and technological sector of SPA "Technopark AT". Dipl. eng. tech. of mech. engineering (USATU, 2008).

TAYMASOVA, Lilia Albertovna, leading engineer-technologist of SPA "Technopark AT". Dipl. eng. tech. of mech. engineering (USATU, 2012).

SAFIULLIN, Rinat Tagirovich, production manager of PJSC "UEC-UEBPA". Dipl. bachelor in electronics (BSU, 2016).

БУХТА, Stanislav Nikolaevich, Dipl. eng. foundry tech. (USATU, 2007).