

УДК 621.9

Технология и оборудование для электрохимической обработки лопаток моноколес газотурбинных двигателей

Деревянченко Сергей Анатольевич

s.derevianchenko@uecrus.com

АО «ОДК» «НИИД» (филиал), Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты, достигнутые при проектировании, изготовлении, наладке оборудования и соответствующей технологии для электрохимической обработки лопаток моноколес. Произведены расчеты режимов и параметров работы генераторов технологического тока, параметров электролита, на основе которых отработаны технологии предварительной (черновой) и окончательной (чистовой) электрохимической обработки. Показано, что технические и конструкторские свойства электрохимического оборудования в комплексе с применяемой технологической оснасткой позволяют обеспечить выполнение требований к обрабатываемым лопаткам моноколес — с одновременным повышением производительности производства моноколес, исключением недостатков, присущие распространенным механическим методам обработки. Сделаны выводы о перспективности применения оборудования и технологии электрохимической обработки в серийном производстве моноколес.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, электрохимическая обработка, лопатка, моноколесо, электрод-инструмент

Technology and equipment for electrochemical processing of blades of blisks of gas turbine engines

Derevianchenko Sergei Anatolievich

s.derevianchenko@uecrus.com

JSC UEC NIID (Branch), Moscow, Russia

Abstract. This work presents the results in the design, manufacture, adjustment of equipment and the corresponding technology for electrochemical processing of blades of blisks. Calculations were made of the operating modes and parameters of the process current generators, electrolyte parameters, on the basis of which technologies of preliminary (rough) and final (finishing) electrochemical processing were developed. It is shown that the technical and design properties of the electrochemical equipment in combination with the applied technological make it possible to ensure that the requirements for the processed blades of blisks are met — with a simultaneous increase in the productivity of blisk production, eliminating the disadvantages inherent in common mechanical processing methods. Conclusions are made about the promise of using equipment and technology for electrochemical processing in serial production of blisks.

Keywords: gas turbine engine, electrochemical processing, blade, blisk, electrode-tool

Введение. Технологии производства деталей современных газотурбинных двигателей (ГТД) включают в себя широкий ряд методов изготовления, причем для обработки деталей из труднообрабатываемых и жаропрочных сплавов все большее распространение получили технологии на основе электрофизических методов.

Одной из важнейших задач, стоящих перед двигателестроителями, является стремление повысить ресурс и надежность ГТД, снизить массу ГТД с одновременным повышением тяги. Применение в ГТД моноколес (блисков) из современных материалов и сплавов позволяет обеспечить решение этих проблем. В настоящее время моноколеса производятся с применением механических методов обработки (фрезерные, токарные операции, линейная сварка трением и другие).

При изготовлении ГТД применяются такие электрофизические методы обработки, как электроэрозионная обработка (ЭЭО), электрохимическая обработка (ЭХО), электролитно-плазменное полирование (ЭПП), электроискровое легирование (ЭИЛ) и прочие [1].

Применение при производстве моноколес такого электрофизического метода, как ЭХО, позволяет повысить производительность производства моноколес, исключить недостатки, присущие механическим методам обработки (приповерхностные напряжения, необходимость полирования обработанных поверхностей лопаток моноколес для достижения требуемой шероховатости и пр.).

ЭХО является эффективным способом серийного производства блисков средних и малых размеров, что подтверждается данными зарубежных исследований [2].

Принцип метода электрохимической обработки заключается в том, что под воздействием электрического тока в электролите происходит растворение материала детали, являющейся анодом (анодное растворение). При этом учитывая, что материал растворяется со всей поверхности детали, находящейся в электролите, соответственно, это метод объемной обработки.

Материалы и методы. Учитывая, что на сегодняшний день отсутствует отечественное оборудование и технология для ЭХО моноколес, перед коллективом филиала АО «ОДК» «НИИД» была поставлена соответствующая задача по разработке оборудования (электрохимический комплекс ЭХК-МК) и по разработке базовой технологии ЭХО лопаток моноколес, с последующей ее доводкой на комплексе ЭХК-МК. В процессе разработки на первом этапе проектирования выполнено 3D-моделирование составных частей комплекса ЭХК-МК, на базе которого проведены инженерные расчеты, выполнена эмуляция функционирования отдельных нагруженных элементов конструкции, разработаны комплекты конструкторской документации для изготовления, монтажа и наладки оборудования.

Внешний вид спроектированного и изготовленного комплекса ЭХК-МК представлен на рис. 1.

В состав электрохимического комплекса ЭХК-МК входят шкаф контроля и управления, станок для ЭХО, два шкафа силовых источников технологиче-

ского тока, электролитная станция с отдельными модулями для подготовки, хранения, подачи и фильтрации электролита [3].

Внешний вид заготовки моноколеса второй ступени КНД ГТД, подготовленной для ЭХО на электрохимическом комплексе ЭХК-МК, представлен на рис. 2.



Рис. 1. Фото электрохимического комплекса ЭХК-МК для ЭХО лопаток моноколес

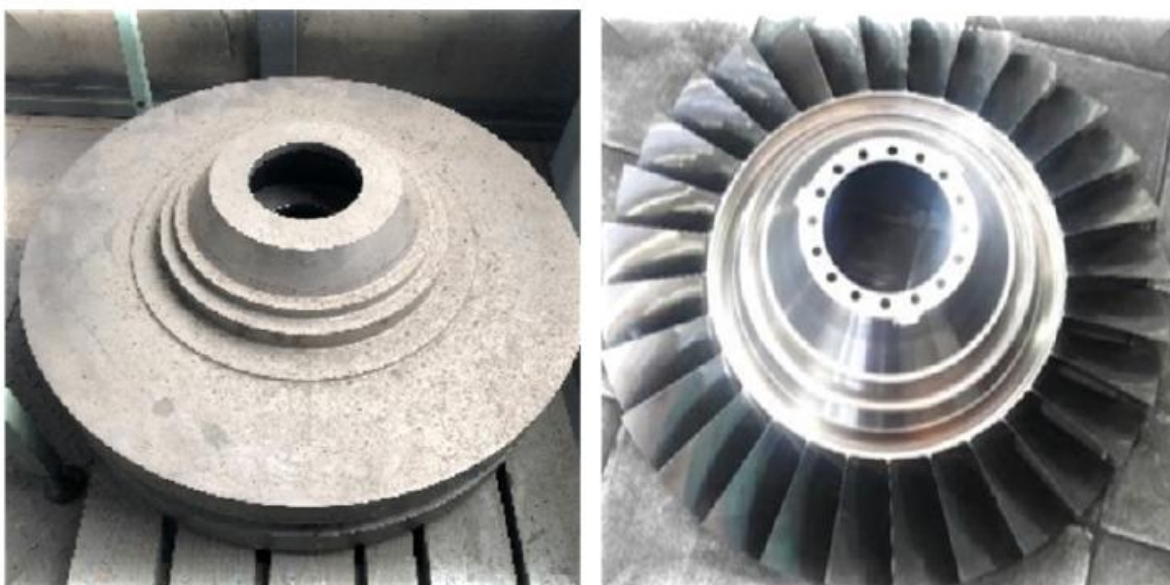


Рис. 2. Фото заготовки и моноколеса второй ступени КНД ГТД

Краткие технические характеристики электрохимического комплекса ЭХК-МК представлены в табл. [3].

Краткие характеристики комплекса ЭХК-МК

Наименование	Значение
Суммарная потребляемая мощность	до 650 кВт
Диаметр / исходный вес заготовки	до 750 мм / до 80 кг
Вращение заготовки относительно ее центральной оси	360°
Вращение заготовки относительно ее вертикального диаметра	±90°
Точность позиционирования заготовки	Линейная ±3,0 мкм / угловая ±5`
Генератор технологического тока: Выходное напряжение Выходной ток (постоянный/импульсный) Минимальная длительность импульса	10–50 В 4 000 / 12 000 А 10 мкс
Материал — титановые сплавы, жаропрочные железоникелевые сплавы, интерметаллидные сплавы	

Рабочая камера станка ЭХО-МК представляет собой отсек с герметичной дверью (для защиты оператора от брызг электролита в процессе ЭХО).



Рис. 3. Фото рабочей камеры станка ЭХО-МК с открытой дверью

Для базирования заготовки моноколеса на планшайбе станка ЭХО-МК разработана и изготовлена технологическая оснастка, внешний вид которой представлен на рис. 4.



Рис. 4. Фото технологической оснастки

Оборудование комплекса ЭХК-МК позволяет реализовать две различные технологии ЭХО:

- копировально-прошивочная ЭХО (черновая ЭХО), обеспечивающая формирование в заготовке моноколеса межлопаточных пазов и черновых заготовок лопаток (так называемое «облопачивание»);

- профильная ЭХО (чистовая ЭХО), обеспечивающая окончательное формирование профилей лопаток и их прикомлевой зоны в районе обода моноколеса.

Для выполнения черновой ЭХО [4] спроектирован, изготовлен и конструкторско-технологически отработан черновой электрод-инструмент, внешний вид которого представлен на рис. 5, а. На рис. 5, б представлен начальный этап отработки технологии черновой ЭХО имитатора моноколеса, на рис. 5, в представлен внешний вид имитатора моноколеса на финишном этапе отработки технологии.

Для выполнения чистовой ЭХО [4] спроектированы, изготовлены и конструкторско-технологически отработаны чистовые электрод-инструменты (для формирования профилей спинки и корыта лопатки), внешний вид которых представлен на рис. 6, а. На рис. 6, б представлен внешний вид заготовки имитатора лопатки до (справа) и после ЭХО (слева). На рис. 6, в представлен внешний вид заготовок имитаторов лопатки после ЭХО.

Выполнены измерения на КИМ профилей лопаток имитатора моноколеса, результаты представлены на рис. 7.

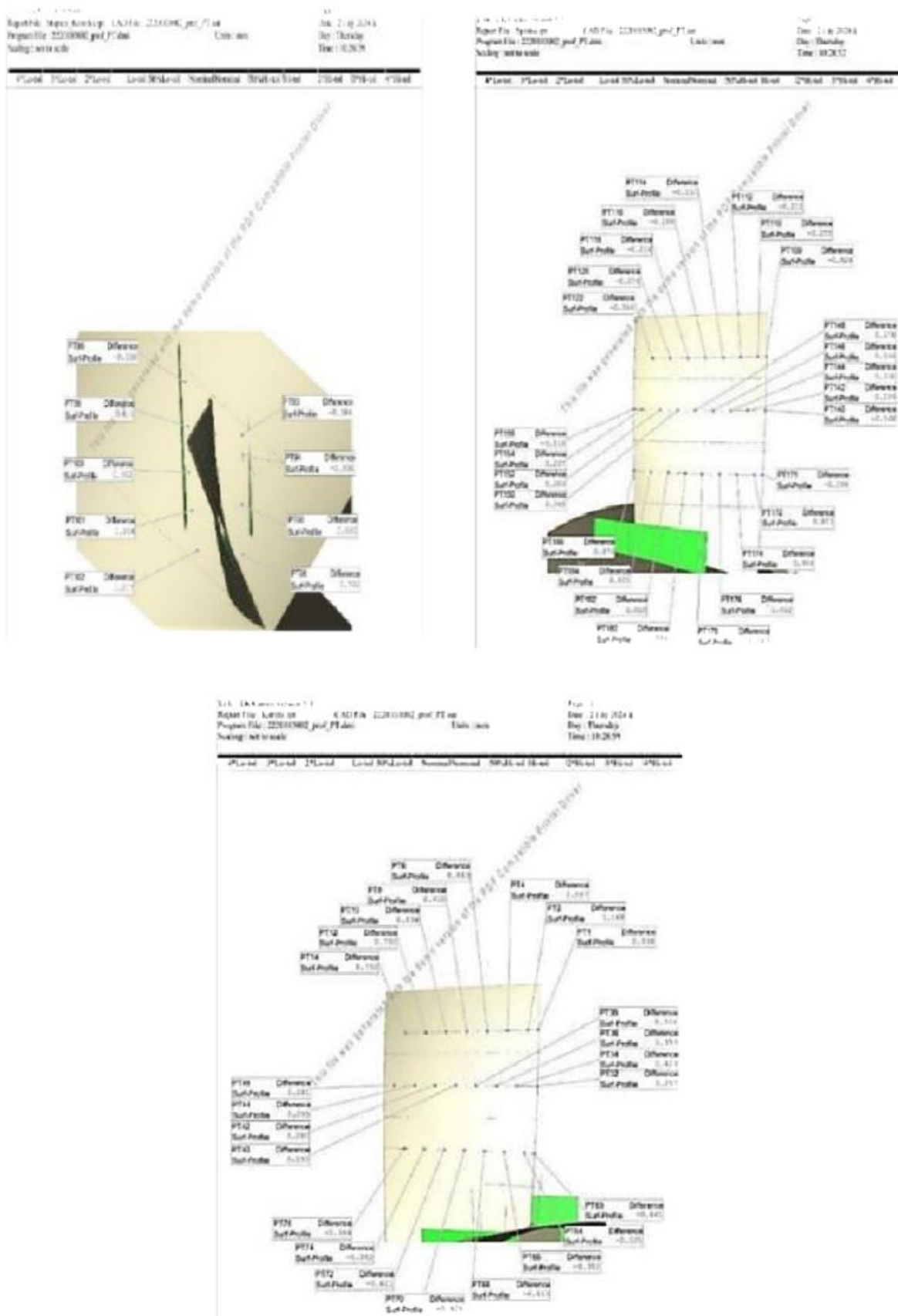


Рис. 7. Результаты измерений на КИМ лопаток имитатора моноколеса

Технологические параметры для обеспечения ЭХО проточной части моноколеса. Электролит — водный раствор 12 % NaCl и 5 % NaNO₃ при температуре 40 °С. Согласно расчетным данным [5] определены режимы чистовой обработки профилей лопаток моноколеса при выполнении ЭХО с применением постоянного и импульсного силового тока.

Постоянный ток с непрерывной подачей электрода (снятие основного припуска 2,5 мм):

- рабочее напряжение $U_{элп} = 15,424$ В;
- межэлектродный зазор (МЭЗ) $Z_{п} = 0,5$ мм;
- ток в МЭЗ $I_{вх} = (2,4 \cdot 10^3)$ А;
- плотность тока $i_{пост} = 23,969$ А/см²;
- нагрев электролита при прохождении через межэлектродный промежуток $\Delta T = 7$ °С;
- производительность $V_{лвх} = 0,627$ мм/мин;
- расход электролита $Q = 2,926$ м³/ч;
- давление электролита $\Delta p = 2,373$ атм;
- припуск, необходимый для выравнивания неравномерности до $\Delta Z_{эхоп} = 0,15$ мм; $Z_{прп} = 1,879$ мм;
- погрешность копирования при постоянном токе $\delta_{кп} = 0,079$ мм;
- время обработки $t_{обр} = (2,5Z_{п})/V_{лвх}$, $t_{обрп} = 3,988$ мин.

Импульсный ток с постоянной подачей электрода (снятие остатка припуска 0,5 мм):

- рабочее напряжение $U_{элп} = 12,869$ В;
- МЭЗ $Z_{п} = 0,3$ мм;
- ток в МЭЗ $I_{вх} = (1,205 \cdot 10^4)$ А;
- плотность тока $i_{пост} = 125,498$ А/см²;
- производительность $V_{лвх} = 0,046$ мм/мин;
- максимальная длина импульса для предотвращения нагрева электролита в МЭЗ более, чем на $\Delta T_{и} = 60$ °С; $\Delta t_{и} = 0,29$ мс;
- припуск, необходимый для выравнивания неравномерности до $\Delta Z_{эхо} = 0,05$ мм; $Z_{прп} = 0,389$ мм;
- погрешность копирования при импульсном токе $\delta_{кп} = 0,076$ мм;
- время обработки $t_{обр} = (0,5Z_{и})/V_{ли}$, $t_{обрп} = 10,971$ мин.

Необходимо отметить, что полученные значения являлись расчетными и дополнительно уточняются по результатам отработки технологии ЭХО и оптимизации режимов и параметров технологического процесса.

Продолжаются работы по дальнейшей отработке технологий черновой и чистовой ЭХО на действующих образцах заготовок моноколеса (рис. 8).

Результаты. Осуществлена предварительная отработка технологий процесса ЭХО по формированию межлопаточного пространства и формированию профилей лопаток моноколеса, по результатам которой ведется доработка указанных технологий с целью дальнейшего повышения производительности. Выполнена модернизация программного обеспечения, аппаратных средств и технологической оснастки комплекса ЭХК-МК по результатам

предварительной отработки технологии ЭХО лопаток моноколес на имитаторе моноколеса. Производительность процесса ЭХО лопаток моноколеса позволяет повысить общую производительность производства моноколес практически в 2 раза.



Рис. 8. Фото заготовки моноколеса, закрепленной на планшайбе станка ЭХО-МК перед черновой ЭХО (слева) и после чистовой ЭХО (справа)

Закключение. На основании утвержденных действующих планов АО «ОДК», в рамках выполняемой работы планируется провести дальнейшую отработку технологии процесса электрохимической обработки моноколес на электрохимическом комплексе ЭХК-МК, что позволит обеспечить применение указанной технологии в серийном производстве моноколес.

Список источников

- [1] Лунев А.Н., Курылев Д.В. Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей. *Фундаментальные исследования*, 2016, № 6–1, с. 78–82. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40375> (дата обращения 12.06.2025).
- [2] Klocke F., Zeis M., Klink A. Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium-and nickel-based alloys for aero engine components. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 369–373.
- [3] *Электрохимический комплекс ЭХК-МК*. Руководство по эксплуатации ТОСА.041828.008РЭ.
- [4] Саушкин С.Б., Митрюшин Е.А., Саушкин Б.П. Пути развития и перспективы применения технологий электрохимической размерной обработки. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2009, № 12, с. 40–45.
- [5] Уваров Л.Б. *Технология производства лопаток компрессора современных газотурбинных установок*. Рыбинск, РГТА, 2005.