

УДК 621.9.048:658.512.4

ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАЛЬЧИКОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ГТД

А.Р. Маннапов

Рассмотрены типовые конструкции пальчиковых уплотнений и традиционные технологии их обработки. Предложена новая технология импульсной электрохимической размерной обработки узких криволинейных межпальчиковых пазов и нанесения регулярных микрорельефов на контактные поверхности пальчиков, приведено описание используемой технологической оснастки и режимы обработки. Статья содержит фотографии колец пальчиковых уплотнений, обработанных по предложенной технологии.

Ключевые слова: пальчиковые уплотнения; электрохимическая обработка; электрод-инструмент; тонкая перфорированная пластина; узкие пазы; регулярные микрорельефы.

1. Описание конструкции, функциональное назначение, принцип работы и условия эксплуатации пальчиковых уплотнений

Одним из путей повышения эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) является совершенствование конструкций радиальных уплотнений, позволяющих сократить паразитные утечки рабочей среды (воздуха, газа, масла) через узкую кольцевую щель между разделяемыми воздухо-воздушными и воздушно-масляными полостями [1-3].

В практике отечественного двигателестроения наибольшее распространение получили лабиринтные уплотнения – гребневого и сотового типа.

В то же время по данным отчётов NASA разработка новых конструкций высокоэффективных уплотнений и технологий их изготовления является одним из основных направлений в улучшении тактико-технических характеристик перспективных авиационных двигателей, таких как удельная тяга, удельный расход топлива, тяговооружённость, ресурс [1, 2]. Одними из наиболее высокоэффективных газоздушных и воздушно-масляных уплотнений для перспективных ГТД являются пальчиковые. Данные уплотнения демонстрируют значительно лучшие герметизирующие свойства по сравнению с лабиринтными, и, конкурируя со щёточными по степени уплотнения радиальных зазоров, сильно выигрывают перед ними по технологичности конструкции и, соответственно, себестоимости изготовления.

Проведённые в NASA Glenn Research Center исследования показали, что замена лабиринтных уплотнений на пальчиковые позволяет снизить утечки рабочей среды на 1...2%, что соответственно приводит к снижению удельного расхода топлива на 0,7...1,4% и прямых эксплуатационных издержек на 0,35...0,7% [1, 2].

В классическую конструкцию пальчикового уплотнения входят как минимум два примыкающих друг к другу кольца (рис. 1). Каждое из них содержит множество равномерно расположенных по окружности пальчиков, образованных путем выполнения узких (шириной 0,2...0,6 мм) пазов между ними. Кольцо, устанавливаемое со стороны полости низкого давления, дополнительно содержит выступающие площадки (т.н. подъёмные площадки), выполненные за одно целое с соответствующими пальчиками. Кольца позиционируются друг относительно друга таким образом, чтобы пальчики каждого кольца перекрывали пазы примыкающего к нему другого кольца, тем самым обеспечивая герметичность перекрываемой кольцевой щели между ротором и статором. Кольца прижаты со стороны полостей низкого и высокого давления кольцевыми крышками для повышения герметичности и жёсткости конструкции в осевом направлении. Кольца пальчикового уплотнения могут быть соединены друг с другом, например, при помощи заклёпок (рис. 2).

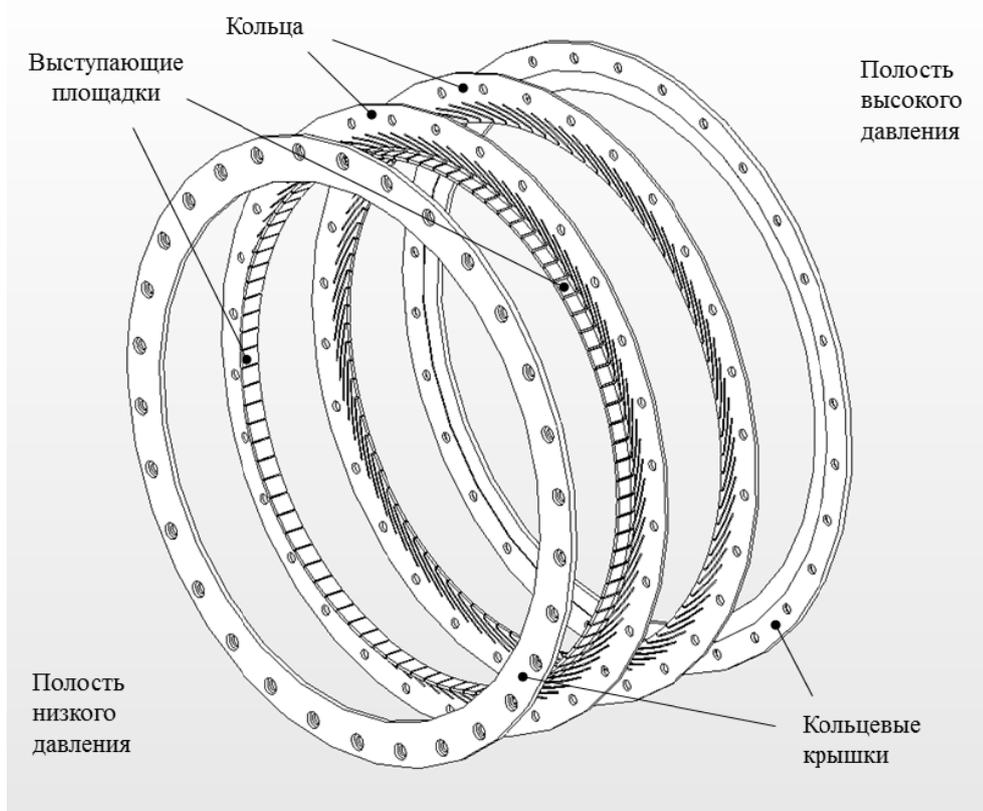


Рис. 1. Классическая конструкция пальчикового уплотнения (в разобранном виде)

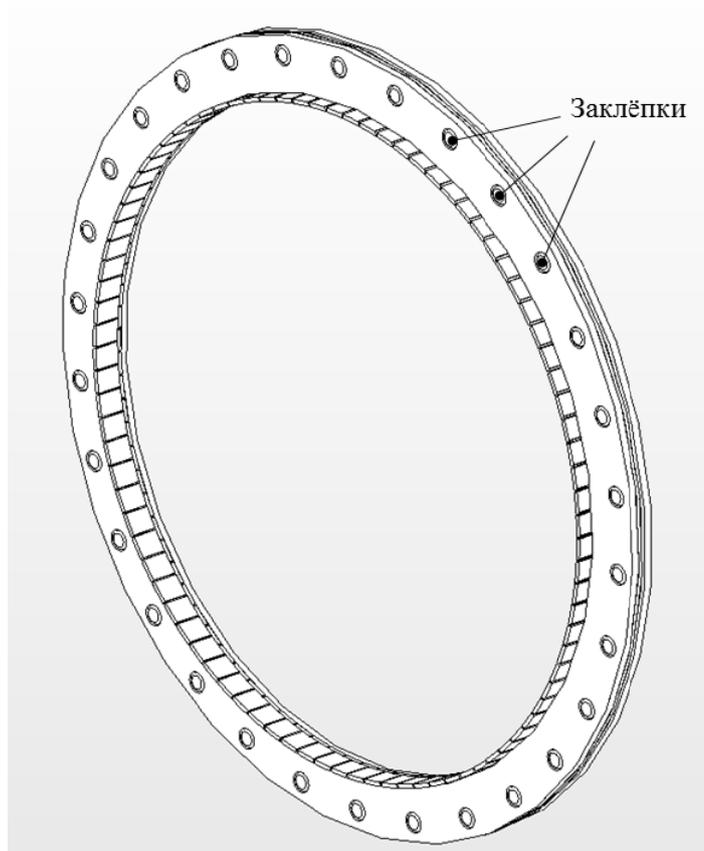


Рис. 2. Классическая конструкция пальчикового уплотнения (в сборе)

В процессе работы двигателя гибкость пальчиков позволяет им отгибаться и таким образом компенсировать вибрации, температурное расширение и отклонение ротора от номинального положения.

Характерные размеры пальчиковых уплотнений следующие:

- посадочный (внутренний) диаметр: 100...450 мм;
- толщина пальчиков: 0,4...1,5 мм;
- ширина подъёмных площадок: 3...8 мм;
- ширина криволинейных пазов: 0,2...0,6 мм;
- длина (протяжённость) криволинейных пазов: 10...40 мм.

Шероховатость контактных поверхностей – порядка R_a 0,2...0,63 мкм, остальных – R_a 1,25 мкм.

Отметим, что пальчиковые уплотнения новых конструкций могут иметь более сложную форму уплотнительных элементов (пальчиков) для обеспечения повышенных упругих, герметизирующих и других свойств, а к их поверхностям должны предъявляться особые требования по коррозионной и износостойкости [3].

Материал пальчиковых уплотнений должен быть жаропрочным, обладать высокими упругими свойствами, коррозионной и износостойкостью, иметь длительный ресурс при повышенной рабочей температуре. В качестве такого материала могут выступать жаропрочные нержавеющие стали, применяемые в конструкциях ГТД в качестве материала для плоских пружин и крепёжных деталей, например, отечественные стали марок 10X11H23T3MP (ЭП33), 11X11H2B2MФ (ЭИ962), 12X18H9T, 20X13 и др.

Традиционно используемые в ГТД лабиринтные уплотнения являются по сути «бесконтактными» и поэтому работают в сильно различающихся условиях по диапазонам температур, окружных скоростей и перепадов давлений. Область же применения пальчиковых уплотнений ограничена необходимостью сохранения высоких механических свойств (в первую очередь упругости) в условиях высоких температур.

Характерными условиями эксплуатации пальчиковых уплотнений могут быть следующие:

- рабочая температура: до 700 °С;
- перепад давлений между полостями: до 1 МПа;
- окружная скорость ротора (вала): до 500 м/с;
- отклонения ротора от номинального положения: до 0,5 мм.

2. Краткий обзор традиционных технологий получения межпальчиковых пазов

Из зарубежных источников известно, что традиционными методами получения узких пазов в кольцах пальчиковых уплотнений являются фотохимическое травление, проволочная электроэрозионная обработка и лазерная резка [1, 2].

Метод фотохимического травления (фотолитография) основан на протравливании материала заготовки в кислотах через «окна» в плёнке фоторезиста (полимерного фоточувствительного материала), которые получены экспонированием плёнки ультрафиолетовым излучением через фотошаблон с последующим растворением определённых участков («окон») фоторезистивной плёнки. Основные недостатки метода фотохимического травления: неэкологичность и небезопасность процесса (ультрафиолетовое излучение, кислоты, щёлочи, ядовитые пары и пр.); необходимость в опытном и высококвалифицированном персонале, особенно при обработке узких пазов (шириной менее 1 мм); существенная зависимость скорости травления (а, следовательно, и точности изготовления) от концентрации, температуры, скорости перемешивания электролита и пр., что ведёт к невысокой повторяемости процесса; подтравливание под фоторезист приводит к возникновению конусообразности боковой по-

верхности паза; разброс величин подтравливания в круговом массиве пазов кольца пальчикового уплотнения.

Немного улучшить точность обработки можно за счёт двустороннего травления, в результате которого пазы приобретают более правильную форму, хотя процесс изготовления в этом случае сам по себе достаточно сложен, поскольку требует прецизионного совмещения оригинал-макетов с обеих сторон.

При проволочной электроэрозионной вырезке пазов в тонком листе (около 1 мм) даже на производительных режимах линейная скорость обработки составляет около 2...10 мм/мин (по контуру), что неприемлемо для условий серийного производства колец пальчиковых уплотнений. Кроме того, на производительных режимах достаточно велика зона термического влияния на материал заготовки.

У лучевых методов (лазерная и электронно-лучевая резка) также имеются серьёзные недостатки (рис. 3). В первую очередь это наличие зоны термического влияния на материал (до 0,05...0,1 мм), оплавление кромок пазов и так называемый «грат» (заусенцы). Уменьшить величину изменённого слоя до допустимого уровня можно только ценой сильного снижения производительности (до нескольких миллиметров в минуту). Дополнительную сложность для резки лучевыми методами представляет наличие выступающих площадок в кольцах низкого давления. Кроме того, оборудование для лучевых методов очень дорого, а эксплуатационные расходы высоки.

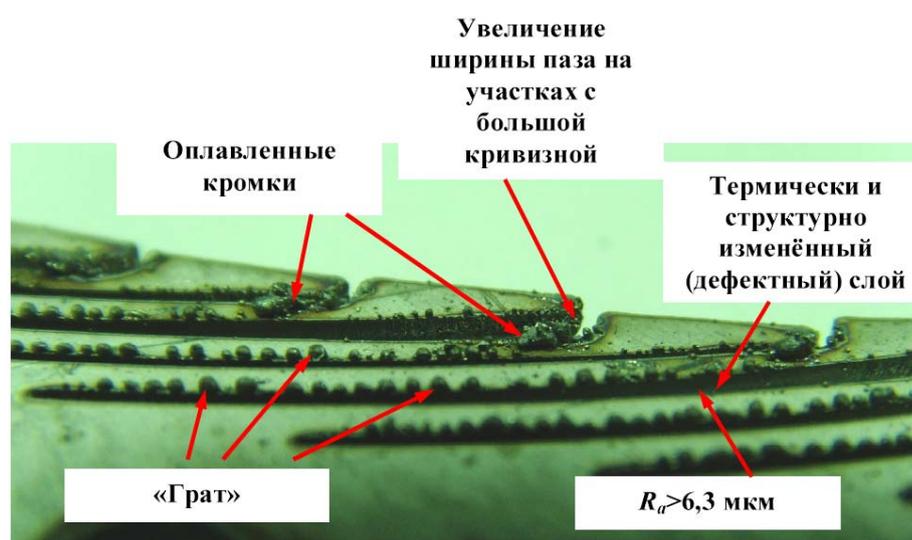


Рис. 3. Внешний вид криволинейных пазов, полученных методом лазерной резки, в кольце высокого давления пальчикового уплотнения

3. Технология импульсной электрохимической обработки колец пальчиковых уплотнений

Ещё одним возможным вариантом получения пазов в кольцах пальчиковых уплотнений является применение импульсной электрохимической обработки (ЭХО) по схеме с вибрацией электрода-инструмента (ЭИ) [3-8], которая позволяет осуществить одновременное прошивание всех межпальчиковых пазов с линейной скоростью 0,01...0,05 мм/мин (в зависимости от обрабатываемого материала) при повторяемости линейных размеров в пределах 0,02...0,03 мм и шероховатости обработанной поверхности R_a 0,2...0,4 мкм.

Технологическая оснастка для прошивания кругового массива криволинейных пазов в кольцах низкого и высокого давления пальчикового уплотнения методом импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ, может иметь, например, следующую конструкцию (рис. 4): 1 – специальный ЭИ с круговым массивом криволинейных выступов (инструмент первого порядка) для обработки кольца пальчикового уплотнения; 2 – держатель; 3 – основание; 4 – прижимное кольцо; 5 – прижимы; 6 – винты для крепления держателя со специальными ЭИ на пиноли станка; 7 – винты для фиксации заготовок колец пальчикового уплотнения на основании.

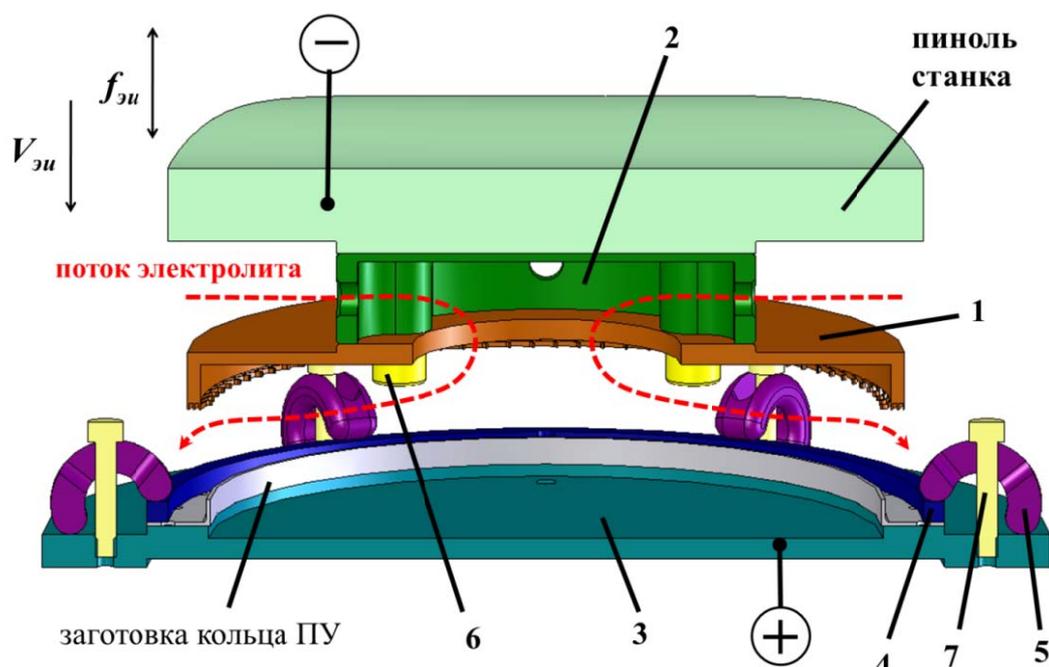


Рис. 4. Технологическая схема одновременного прошивания всех криволинейных пазов в кольцах высокого и низкого давления пальчикового уплотнения методом импульсной ЭХО

Сущность технологической схемы заключается в следующем (рис. 4). Основание 3 крепится на столе электрохимического станка, гальванически соединённого с положительным полюсом источника технологического тока, при помощи прижимов. Заготовка кольца пальчикового уплотнения прижимается к основанию 3 по периметру при помощи прижимного кольца 4 и прижимов 5, усилие прижатия которых регулируется винтами 7.

Специальный ЭИ 1 с держателем 2 крепятся на пиноли станка, гальванически соединённой с отрицательным полюсом технологического тока, посредством винтов 6.

Во время обработки специальному ЭИ 1 сообщается движение подачи со скоростью $V_{эи}$ в направлении обрабатываемой поверхности заготовки кольца пальчикового уплотнения и соосное с ним возвратно-поступательное колебательное движение с частотой $f_{эи}$ примерно по гармоническому закону.

Импульс или группа импульсов тока подаётся на электроды в каждый период колебательного движения в момент, предшествующий моменту нижнего положения ЭИ, и заканчивается, как правило, после достижения этого момента. Смещение момента начала подачи импульса (группы импульсов) относительно момента нижнего положения ЭИ может регулироваться из системы управления станка (рис. 5).

Характерные параметры режима рассматриваемой технологической операции приведены в табл. 1.

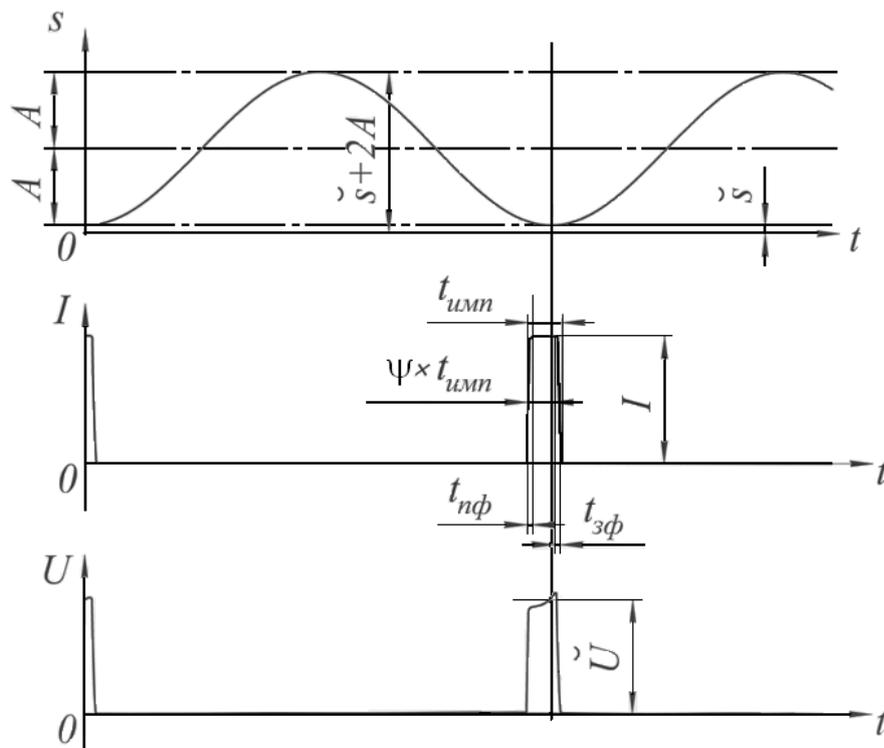


Рис. 5. Осциллограммы колебательного движения ЭИ, подачи импульсов тока и напряжения (сверху вниз соответственно)

Характерные параметры режима ЭХО колец пальчиковых уплотнений

Параметр режима	Обозначение	Значение
Заданное напряжение в нижнем положении ЭИ, В	U_0	7,5...10
Длительность импульса тока, мс	$t_{имп}$	0,6...1,5
Скорость подачи ЭИ, мм/мин	$V_{эи}$	0,01...0,05
Частота колебаний ЭИ, Гц	$f_{эи}$	35...50
Амплитуда колебаний ЭИ, мм	A	0,05...0,15
Давление электролита, создаваемое насосом на входе в станок, кПа	$P_{эл}$	100...350
Относительное смещение момента нижнего положения ЭИ от момента начала подачи импульса тока, %	ψ	50...110

В результате прохождения тока высокой плотности (порядка 100 А/см^2 под торцем ЭИ) происходит высокоскоростное анодное растворение материала заготовки, которое наиболее интенсивно происходит в заготовке напротив криволинейных выступов в специальном ЭИ, что приводит к образованию кругового массива криволинейных пазов в заготовке кольца пальчикового уплотнения.

Для осуществления операции одновременного прошивания кругового массива пазов требуется специальный ЭИ с фасонными выступами, соответствующими по форме криволинейным пазам в кольцах пальчиковых уплотнений. Для изготовления такого ЭИ может быть использован, например, способ импульсной ЭХО электродом-инструментом в виде тонкой перфорированной пластины (далее – ЭИ-ТПП) [3, 9, 10], в которой щелевые отверстия имеют конфигурацию подобную форме пазов в кольцах пальчикового уплотнения.

Технологическая оснастка для «вырезки» кругового массива криволинейных выступов в заготовке специального ЭИ содержит (рис. 6): 1 – корпус электрододержателя; 2 – держатель; 3 – ЭИ-ТПП с круговым массивом криволинейных щелевых отверстий (инструмент второго порядка); 4 – внешнее прижимное кольцо; 5 – внутреннее прижимное кольцо; 6 – крышка; 7 – заглушки; 8 – основание; 9 – винты для крепления узла электрододержателя к пиноли станка; 10 – винты для крепления заготовок специального ЭИ на основании; 11 – винты для крепления прижимных колец 4 и 5.

Данная оснастка может быть собрана по трём вариантам, отличающимся схемой организации подачи электролита в межэлектродный промежуток (МЭП). В приведённом на рис. 6 примере электролит подаётся через отверстия в державке, проходит через внутреннюю полость корпуса электрододержателя 1 и затем попадает в МЭП.

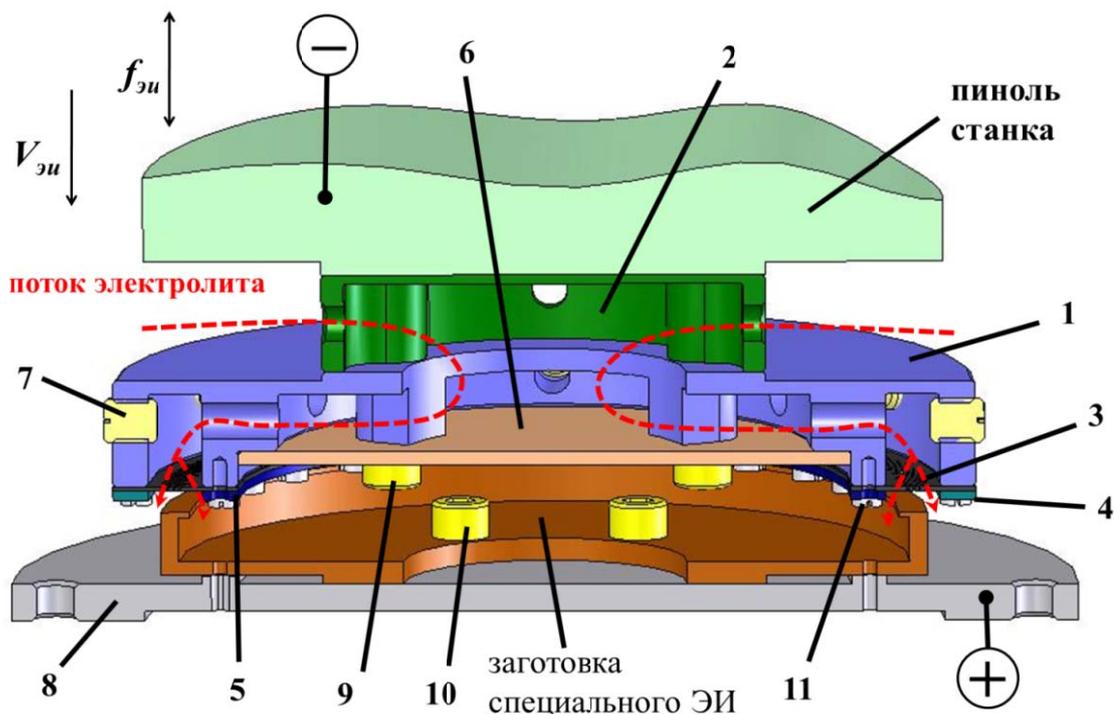


Рис. 6. Технологическая схема ЭХО специального ЭИ

Основание 8 крепится на столе электрохимического станка, гальванически соединённого с положительным полюсом источника технологического тока, при помощи прижимов. Корпус электрододержателя 1 с держателем 2 закрепляются на пиноли станка, гальванически соединённой с отрицательным полюсом технологического тока, посредством винтов 9. Заготовка специального ЭИ крепится на основании 8 при помощи винтов 10.

Кинематика движения электродов и схема подачи импульсов тока аналогичны схеме, описанной выше для ЭХО пазов в кольцах пальчикового уплотнения.

Отличительной особенностью данной схемы ЭХО от традиционно используемых является использование маложёсткого тонкостенного ЭИ, что предполагает учёт его омического сопротивления, механических и температурных деформаций от периодических гидродинамических нагрузок и тепловыделения в МЭП при моделировании процесса обработки [3, 9, 10].

В соответствии с приведёнными технологическими схемами изготовлены специальные ЭИ с круговым массивом криволинейных выступов (рис. 7) и кольца пальчиковых уплотнений с круговым массивом криволинейных пазов (рис. 8-11).

Предложенная технология разработана в рамках выполнения ФЦП “Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года”.



а)



б)



в)

Рис. 7. Специальные электроды-инструменты из стали 20X13 с круговым массивом тонких (толщиной около 0,2 мм) криволинейных выступов: а, б – для ЭХО колец пальчикового уплотнения классической конструкции, в – для ЭХО колец пальчикового уплотнения с зигзагообразными пазами

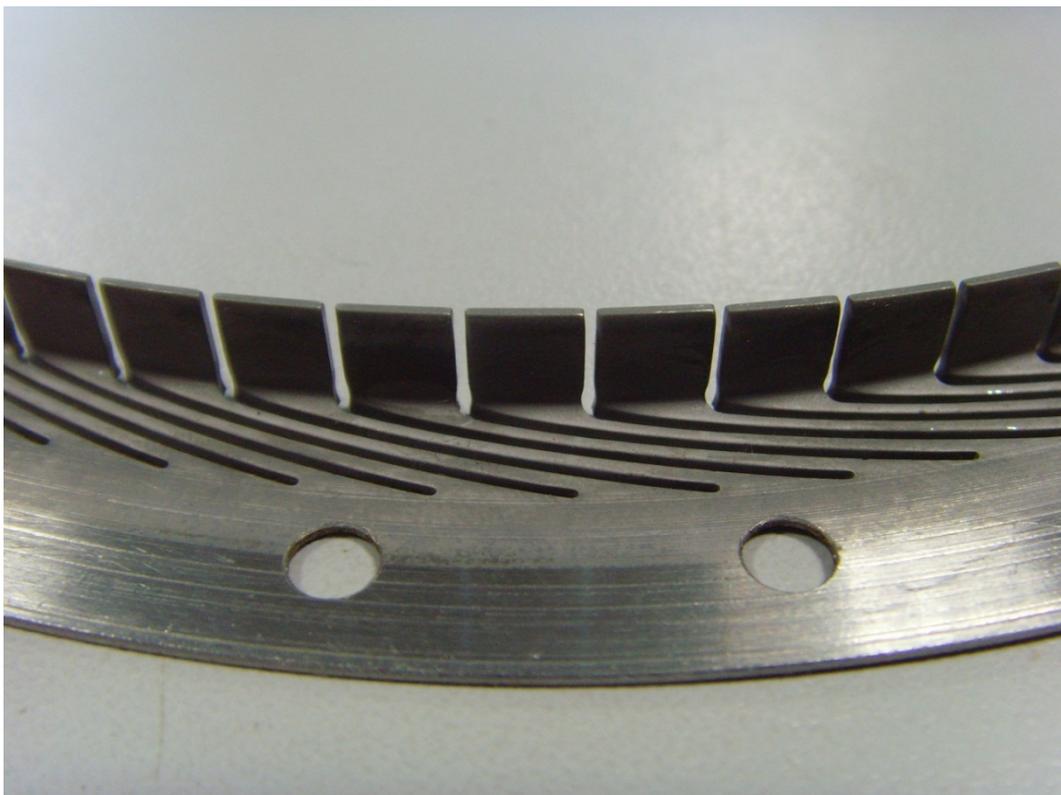
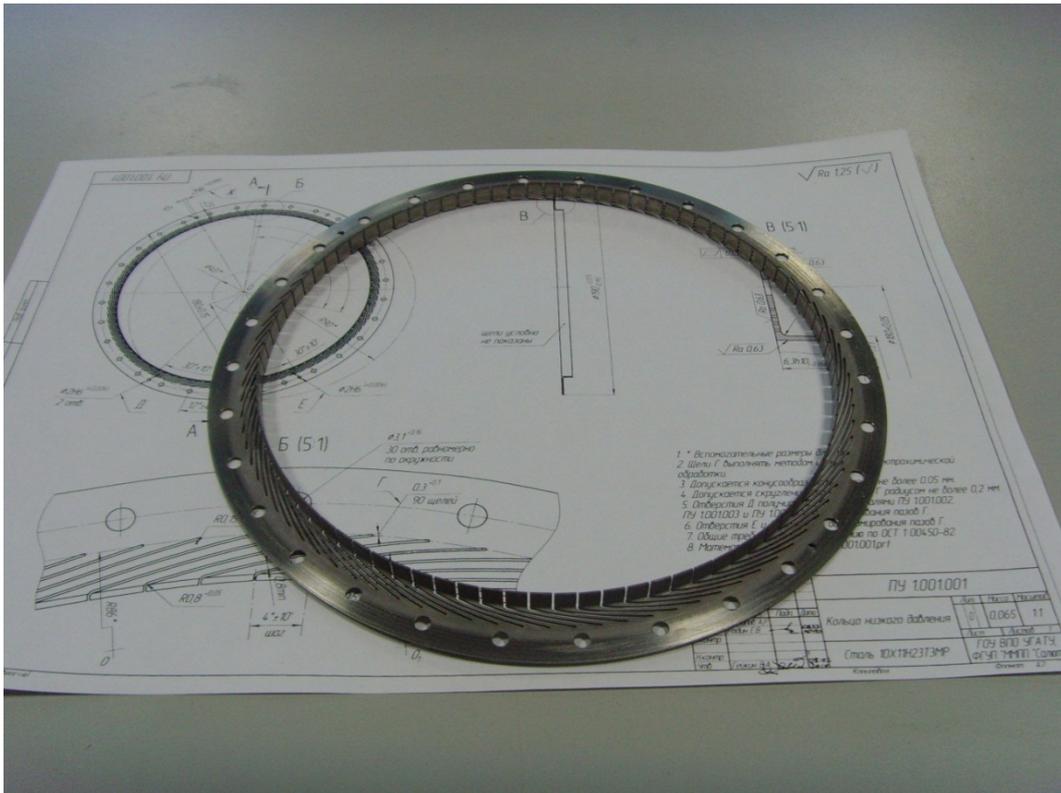


Рис. 8. Кольцо низкого давления пальчикового уплотнения классической конструкции (материал: сталь 10X11H23T3MP, посадочный диаметр: 160 мм, внешний диаметр: 190 мм, количество пазов: 90 шт.)

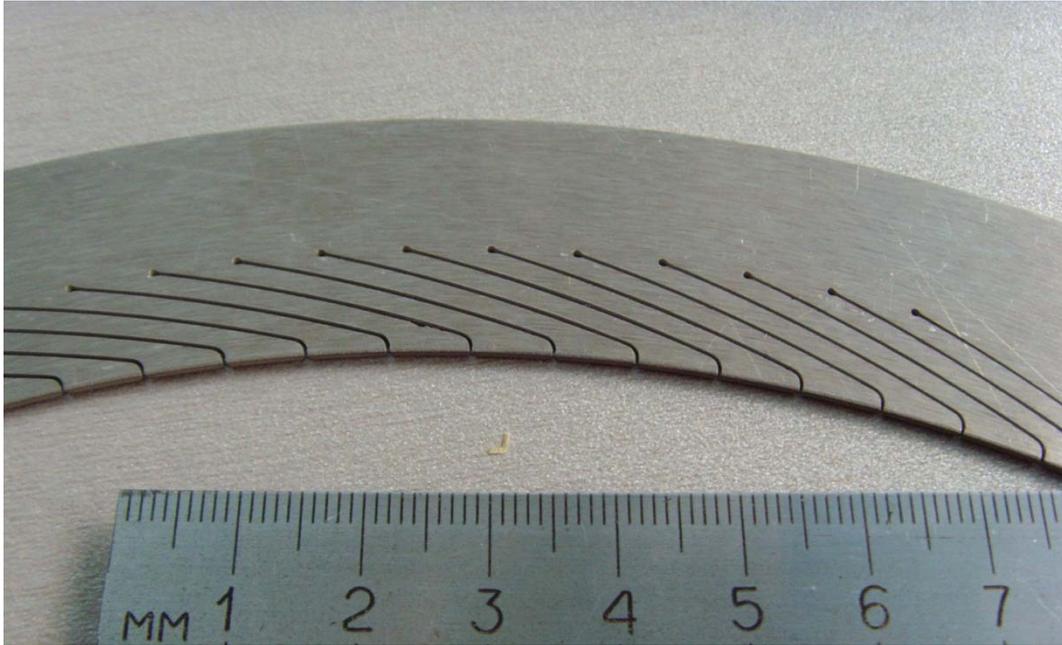


Рис. 9. Кольцо высокого давления пальчикового уплотнения классической конструкции (материал: сталь 20X13, посадочный диаметр: 270 мм, внешний диаметр: 320 мм, количество пазов: 120 шт.), обработанное методом ЭХО за 3 перехода при помощи секторного электрода-инструмента (одновременно прошивалось 40 пазов за один переход)

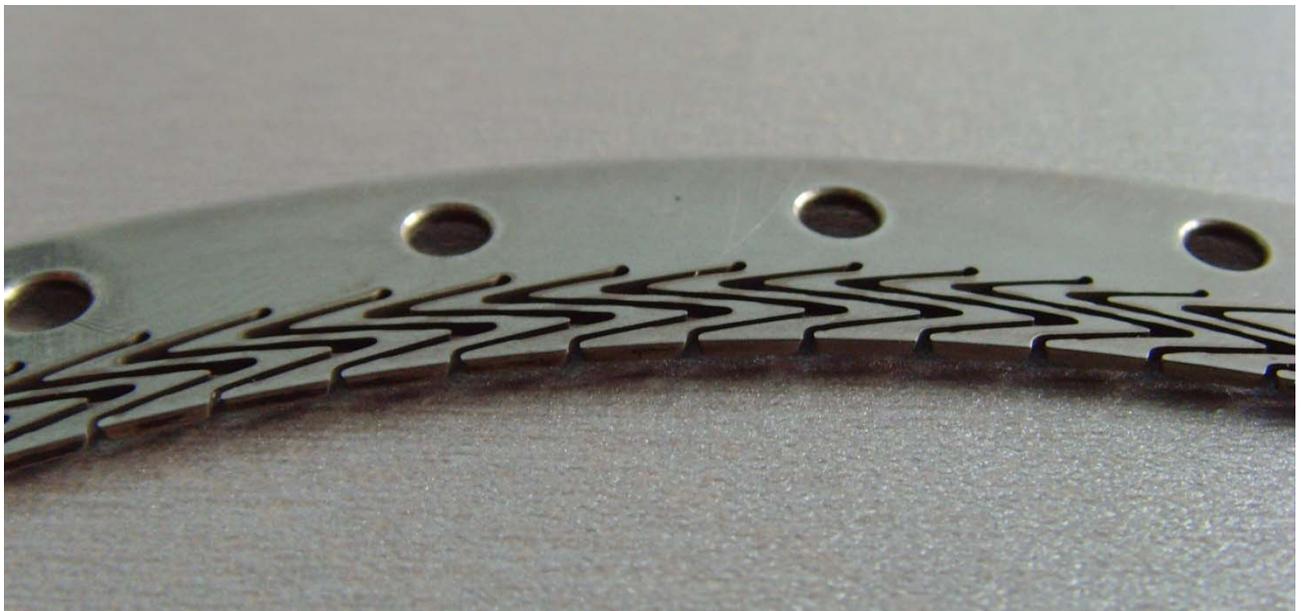


Рис. 10. Кольцо высокого давления с зигзагообразными пальчиками и пазами (материал: сталь 20X13, посадочный диаметр: 160 мм, внешний диаметр: 190 мм, количество пазов: 90 шт.)



Рис. 11. Компактное пальчиковое уплотнение (материал: сталь 10X11H23T3MP, посадочный диаметр: 160 мм, внешний диаметр: 182 мм, количество пазов: 90 шт.)

Улучшение газодинамической эффективности пальчикового уплотнения может быть достигнуто за счёт использования различных рельефов и регулярных микрорельефов на контактных поверхностях пальчиков. Для электрохимического нанесения рельефов и микрорельефов различных форм и размеров сначала необходимо изготовить специальный ЭИ с ответным по форме микрорельефом (рис. 12), что может быть реализовано в соответствии с технологической схемой импульсной ЭХО вибрирующим ЭИ-ТПП [9, 10].



Рис. 12. Специальный ЭИ с зигзагообразными выступами для нанесения рельефа методом импульсной ЭХО

Примеры колец низкого давления с нанесённым на контактную поверхность рельефом показаны на рис. 13, 14.

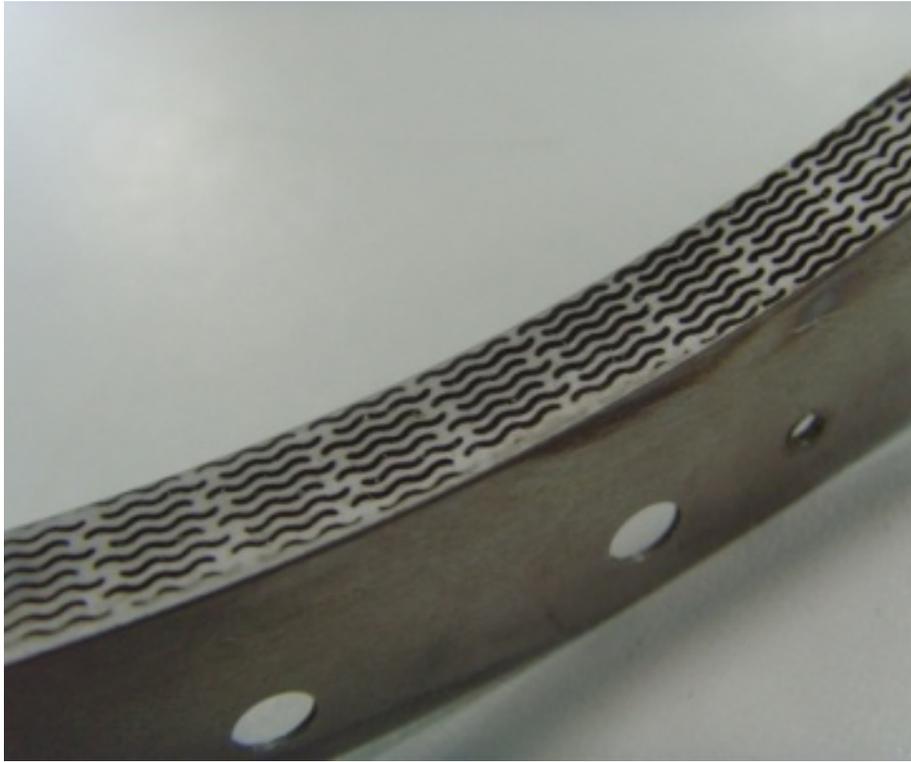


Рис. 13. Кольцо низкого давления с нанесённым на внутреннюю поверхность кольца низкого давления пальчикового уплотнения зигзагообразным рельефом

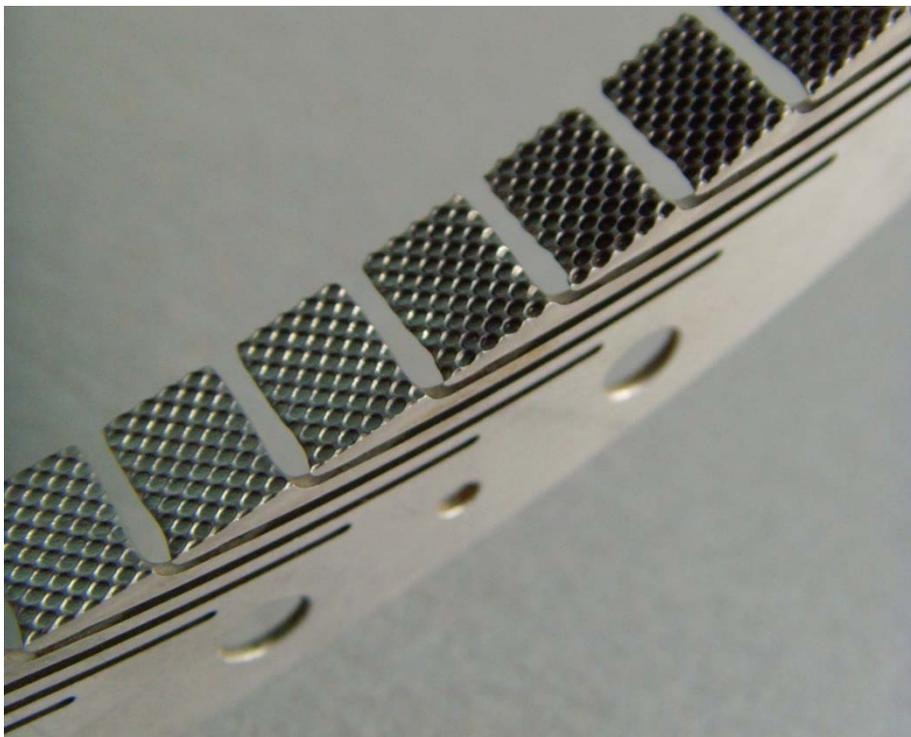


Рис. 14. Кольцо низкого давления пальчикового уплотнения с нанесённым на контактную поверхность подъёмных площадок регулярным микрорельефом

Таким образом, совершенствование технологии изготовления пальчиковых уплотнений позволяет создавать новые перспективные конструкции, которые ранее не могли быть технологически реализованы.

Изготовленный узел пальчикового уплотнения классической конструкции в сборе показан на рис. 15. В приведённом примере соединение колец высокого и низкого давления и кольцевых крышек друг с другом реализовано при помощи шести равномерно расположенных по периметру заклёпок.

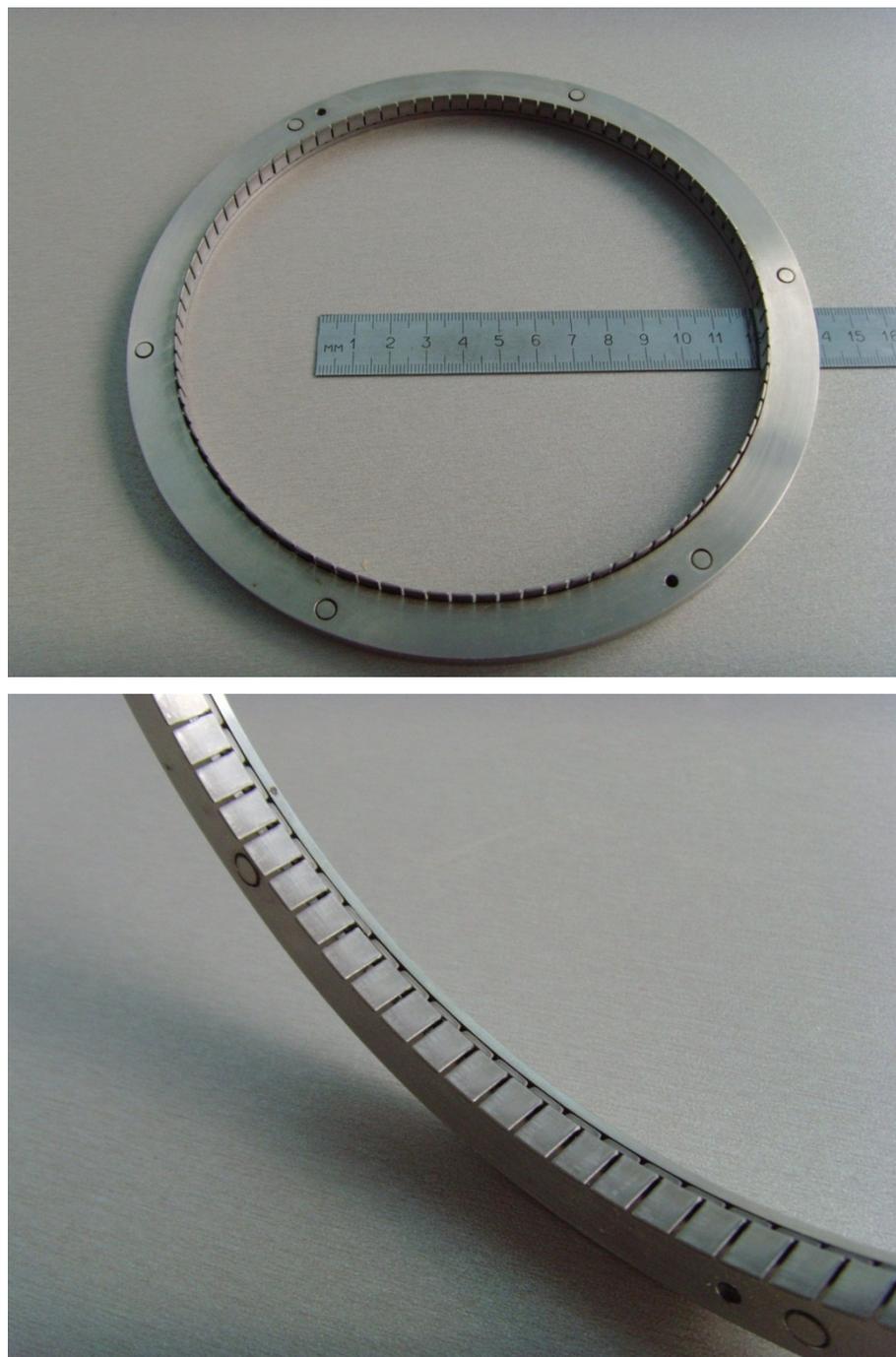


Рис. 15. Пальчиковое уплотнение в сборе

Статья подготовлена в рамках реализации гранта Республики Башкортостан молодым учёным и молодежным научным коллективам на 2011 год.

Библиографический список

1. Steinetz B. M., Hendricks R. C. 2005 NASA Seal/Secondary Air System Workshop. NASA CP – 2006-214383-VOL 1. – 2006. – 542 p.
2. Proctor M.P., Kumar A., Delgado I.R. High-Speed, High-Temperature Finger Seal Tests Results. NASA/TM – 2002-211589, ARL-TR-2781, AIAA-2002-3793. – 2002. – 19 p.
3. Маннапов А.Р. Разработка технологии изготовления перспективных уплотнений газоздушного тракта ГТД методом импульсной электрохимической обработки: Дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2009. – 206 с.
4. Маннапов А.Р. Сравнительный анализ технологий обработки пальчиковых уплотнений ГТД высококонцентрированными потоками энергии // XXXVI Гагаринские чтения. Научные труды международной молодёжной научной конференции в 8 томах. М.: МАТИ, 2010. – Т. 3. – 154 с. – С. 110-112.
5. Маннапов А.Р. Пальчиковые уплотнения для современных ГТД и технология их изготовления // Сборник трудов научной конференции. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. – 238 с. – С. 3-6.
6. Маннапов А.Р., Идрисов Т.Р., Зайцев А.Н. Теория процесса импульсной электрохимической обработки вибрирующим электродом-инструментом: учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 88 с.
7. Маннапов А.Р. Применение импульсной электрохимической обработки в современном авиадвигателестроении // Теория и практика современных электрохимических производств. Сборник тезисов докладов. Том. I. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2010. – 97 с. – С. 40-42.
8. Маннапов А.Р., Дрозденко В.Н., Серавкин Н.В. и др. Применение прецизионных электрохимических станков серии «ЕТ» в производстве деталей для современных авиадвигателей. – Двигатель. – Москва, 2010. – № 4 (70). – С. 26-29.
9. Маннапов А.Р., Зайцев А.Н. Особенности вырезки массивов малоразмерных близко расположенных выступов методом импульсной электрохимической обработки. – Труды МАИ (электронный журнал). – 2010. – Выпуск № 38.
10. Маннапов А.Р., Зайцев А.Н. Особенности электрохимической вырезки массивов малоразмерных выступов тонкой перфорированной пластиной. – Труды ГОСНИТИ. – Москва, 2010. – Том. 106. – С. 86-90.

Сведения об авторе

Маннапов Альберт Раисович, старший научный сотрудник научно-исследовательской части УГАТУ, доцент кафедры «Управление инновациями», к.т.н.,

e-mail: mannapov_albert@mail.ru

50000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, УГАТУ