НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

О проблемах и перспективах изготовления прецизионных компрессорных лопаток

 # 04, апрель 2014

DOI: 10.7463/0414.0705085

[1]Галиев В.Э., [2]Фаткуллина Д.З., [3]Таминдаров Д.Р.

УДК 621.9.044+621.9.047

Россия, [1]ОАО ИНТЦ «Искра»
[2]ООО "СПКТБ Нефтегазмаш"
[3]ООО “НПП”Уралавиаспецтехнология”
ufa-iskra@yandex.ru
dilyarochkaf@list.ru
tamdamir@yandex.ru

Введение

Лопатки компрессора являются ответственными деталями. К ним предъявляются жесткие требования к точности, качеству поверхностного слоя и прочностным характеристикам.

При производстве новых двигателей (ПД-14, SaM146) наблюдается тенденция применения прецизионных сложнопрофильных тонкостенных лопаток из титановых сплавов (ВТ6, ВТ8М) и жаропрочных сталей (ЭП-718, ЭИ-787) 1 класса точности, в которых отклонения координат точек профиля должно быть не более ±0,02 мм.

Актуальность работы связана с необходимостью высокопроизводительного изготовления лопаток существующих и перспективных изделий с повышенной точностью, качеством поверхностного слоя и эксплуатационными характеристиками.

Существующие технологии изготовления лопаток компрессора не позволяют получать годные детали. Это связано со следующими проблемами:

- низкая точность и производительность обработки механическими методами;
- высокая стоимость и износ режущего инструмента при обработке механическими методами;
- недостаточная точность электрохимической обработки (ЭХО) пера лопаток на существующих станках;
- необходимость ручного полирования поверхности пера лопаток;

- нестабильное качество процесса изготовления и упрочнения тонкостенных лопаток;
- низкая точность базирования при обработке и контроле;
- низкая точность существующих средств измерения.

Цель работы – разработка комплексной технологии изготовления пера лопаток на базе технологических процессов, исключающих применение ручных шлифовальных и полировальных способов обработки.

Результатом работы является предложенный вариант разрабатываемой технологии.

Научная новизна работы состоит в том, что в представленном технологическом процессе изготовления пера лопатки исключено механическое воздействие на материал, обработка производится методами размерной прецизионной ЭХО, электролитно-плазменного полирования и ионно-плазменного упрочнения поверхностного слоя.

Основная часть

Достижение цели работы требует решения следующих задач:

1. Анализ существующих технологий изготовления прецизионных лопаток.
2. Анализ применяемых систем базирования лопаток в процессе изготовления.
3. Анализ существующих способов контроля геометрических параметров пера лопаток.
4. Анализ преимуществ способа прецизионной ЭХО.
5. Разработка варианта комплексной технологии изготовления прецизионных лопаток.

1. Анализ существующих технологий изготовления прецизионных лопаток

Основными конструктивными элементами, оказывающими влияние на технологию изготовления лопаток турбины и компрессора, являются: материал лопатки, габаритные размеры, наличие одной или двух полок, закрутка пера, толщина кромок, форма хвостовика, величина радиусов сопряжения профильной части пера с полкой, форма трактовой поверхности полки, заданная точность выполнения этих элементов.

В настоящее время перо лопаток изготавливаются фрезерованием, вальцеванием и с помощью ЭХО.

Анализ существующих технологий изготовления прецизионных лопаток (рис.1) показал, что в результате вальцевания пера лопатки, происходит некоторое упрочнение поверхности. Кроме того, этот процесс является высокопроизводительным, после него не требуется механическая обработка со снятием стружки. Однако дальнейшее фрезерование прикомлевых участков приводит к различиям деформаций у корневого сечения и в остальных частях пера лопатки, что вызывает появление растягивающих напряжений и структурных преобразований, которые необходимо затем стабилизировать последующей термообработкой.

В результате вальцевания возможно возникновение микротрещин, образование наплыва на прикомлевой части пера. При дальнейшем фрезеровании прикомлевого участка и удалении облоя по перу возможны прижоги обрабатываемых поверхностей. К недостаткам этой технологии также относятся необходимость получения точных заготовок, значительное ограничение по материалам (некоторые жаропрочные стали, ВТ3-1) и площади лопаток, высокая стоимость оснастки [1].

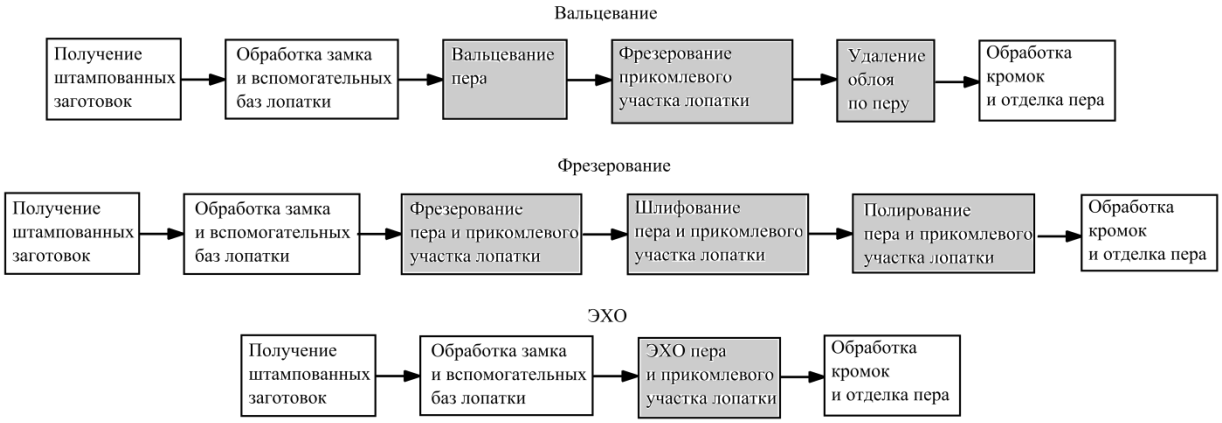


Рис. 1. Существующие технологические процессы изготовления прецизионных лопаток

Фрезерование лопаток на станках с программным управлением позволяет получать лопатки с точностью порядка 0,1 мм. К достоинствам рассматриваемого технологического процесса можно отнести низкие затраты на технологическую подготовку производства.

Значительные усилия резания, приводящие к деформациям и снижению усталостной прочности тонкостенных лопаток, вызывают необходимость в последующей ручной доработке и упрочнении пера. Недостатком данной технологии являются также низкая производительность, высокая стоимость оборудования, большие затраты на режущий инструмент.

Основными достоинствами ЭХО являются [2]:

1) хорошая производительность, не зависящая от механических свойств обрабатываемого материала;

2) возможность обработки геометрически сложных поверхностей;

3) отсутствие износа инструмента;

4) отсутствие дефектного слоя обрабатываемых поверхностей.

Тем не менее, традиционный способ ЭХО пера лопаток не исключает необходимость последующей обработки кромок механическим методом и ручной отделки пера, что связано с недостаточной точностью и качеством обрабатываемых поверхностей. К недостаткам данной технологии можно также отнести высокую стоимость оснастки.

2. Анализ применяемых систем базирования лопаток в процессе изготовления

При изготовлении лопаток одним из наиболее важных вопросов является выбор оптимальной системы базирования. Проблема заключается в сложной пространственной форме пера, отсутствии развитых поверхностей для точного базирования при обработке и контроле, малой жесткости тонкостенных лопаток.

На основе анализа рабочих чертежей лопаток сформулированы основные принципы проектирования технологических процессов производства лопаток, соблюдение которых необходимо для обеспечения точности и качества обработки лопаток [1]:

1) в качестве технологических баз использовать конструкторские базы детали, либо вспомогательные базы;

2) одновременно выполнять принцип совмещения и единства баз на всех операциях технологического процесса;

3) применять методы обработки, обеспечивающие совмещение формообразования всех элементов проточной части лопаток за один установ;

4) в первую очередь обрабатывать элементы проточной части лопаток, а затем элементы хвостовика.

На первой операции происходит создание комплекта технологических баз, базирование заготовок производится по перу. Выбор оптимальной системы базирование на этой операции является сложной задачей для обработки заготовок лопаток с малыми припусками по перу или полном его отсутствии. Возможным решением этой проблемы является заливка лопатки в брикет в определенном, предварительно найденном положении, или обработки на ней комплекта базовых поверхностей, которые в дальнейшем могли бы быть использованы для обработки хвостовика и проточной части [1].

Дальнейшая обработка лопатки происходит от полученных технологических баз. Возможны различные варианты базирования в процессе изготовления, зависящие от конструкции лопаток. Существующие схемы базирования лопаток можно разделить на следующие группы по способу установки заготовки:

1) базирование заготовки непосредственно на станке;

2) базирование заготовки, используя переналаживаемую по габаритам лопаток оснастку;

3) базирование заготовки, используя унифицированную оснастку;

4) базирование заготовки лопатки залитой в брикет.

Базирование заготовки непосредственно на станке допускает обработку только методами, не связанными со значительными усилиями. Базирование лопаток с использованием оснастки или заливки в брикет позволяют вести обработку фрезерованием.

Рассмотрим системы базирования, применяемые в процессе изготовления лопаток (рис.2).

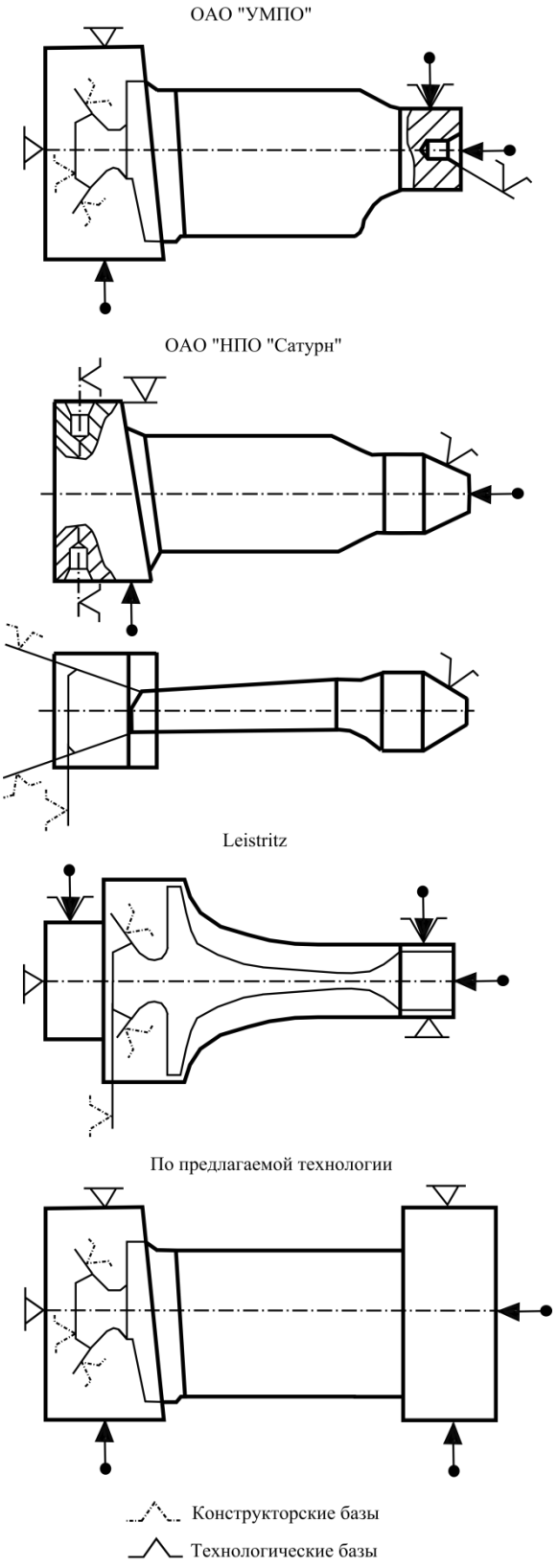


Рис. 2. Системы базирования лопаток в процессе изготовления

Система базирования применяемая в ОАО «КМПО» (г. Казань) предназначена для изготовления лопаток с хвостовиком типа «ласточкин хвост». Заготовку лопатки в виде шлифованного бруска подвергают ЭХО с целью получения пера лопатки. Далее

производится обработка замковой части. Конечным этапом изготовления лопаток является обрезка лишнего металла. Данная технология основана на принципе постоянства баз, все операции формообразования пера и замковой части производятся при базировании лопатки относитльно одних и тех же поверхностей. Достоинством этой системы является жесткость заготовки во время обработки, хорошая точность базирования. Недостаток – малый КИМ.

По технологии, применяемой на предприятии Leistritz (Германия), заготовкой лопатки является штамповка. На первом этапе изготовления производится обработка масссивной бобышки, по которой происходит базирование заготовки на следующих операциях. Профиль пера получают методом ЭХО. Далее происходит обработка замка лопатки, которую для большей жесткости предворительно заливают легкоплавким сплавом в брикет. Последний этап изготвления лопаток по рассматриваемому технологическому процессу – обрезка. Данная технология также основана на принципе постоянства баз. Достоинство этой системы является высокая точность базирования заготовки в процессе изготовления.

Система базирования лопаток в процессе изготовления, применяемая в ОАО «УМПО», предназначена для лопаток компрессора с хвостовиком типа «ласточкин хвост». Она основана на принципе совмещения конструкторских и технологических баз. Изначально получают предварительные базы, далее на их основе изготавливают замок. Обработка пера лопатки производится от замка. К недостаткам этой системы относятся сложная геометрия баз, низкая точность базирования при изготовлении и контроле лопаток.

Система базирования лопаток в процессе изготовления, применяемая на предприятии ОАО «НПО «Сатурн» (г. Рыбинск), основана на принципе постоянства баз. На первом этапе изготовления лопаток получают технологические вспомогательные базы (например, центровые отверстия). Дальнейшая обработка пера производится от вспомогательных баз. Преимущества такой системы базирования заключаются в простой форме баз, отсутствии травления замка, недостаток – ограниченная номенклатура лопаток.

На рис.2 представлена система базирования лопаток, применяемая в процессе изготовления лопаток по предлагаемой технологии. Данная система базирования также основана на принципе постоянства баз. В первую очередь получают технологические вспомогательные базы (призматические). С этой целью штампованную заготовку предварительно центруют, после чего производят обработку граней хвостовика. Обработка пера и замка производится от вспомогательных баз. Преимущества такой системы базирования заключаются в простой форме баз, отсутствии травления замка. Недостатком является снижение КИМ на 8..12 % при изготовлении лопаток.

3. Анализ существующих способов контроля геометрических параметров пера лопаток

Контроль лопаток – важная и неотъемлемая часть технологического процесса их изготовления. В процессе производства контролю подлежат десятки геометрических парамет-

ров лопаток, определяемые требованиями технических условий, конструкторской и технологической документации, утвержденными образцам, эталонам и условиями поставки.

Принимая к рассмотрению пространственную сложность формы лопаток для обеспечения подобных объемов контроля необходимо проводить измерения многих геометрических параметров:

- угол поворота профиля пера;
- радиуса входной и выходной кромок;
- координаты точек профиля пера;
- ширина хорды;
- расположение профиля относительно оси замка;
- Cmax, C1, C2.

Современные методы контроля геометрии изделий можно разделить на два больших класса: контактные (координатно-измерительные машины, шаблонные приборы, измерительные проекторы - ПОМКЛ) и бесконтактные, среди которых наиболее распространены триангуляционные и стереоскопические [3].

Обычно контроль проводят с помощью визуальных шаблонных приборов и прибора типа ПОМКЛ. Основным недостатком данного метода является сложность технологии контроля. Погрешность измерений прибора типа ПОМКЛ может достигать 0,1 мм.

С помощью трехмерной оптической системы ATOS можно быстро выполнить измерения больших и сложных объектов с высоким локальным разрешением. К недостаткам данного метода можно отнести низкую производительность, необходимость предварительной подготовки поверхности лопатки к измерениям. Погрешность измерения более 0,06 мм. Такие стереоскопические системы используются для выборочного контроля.

К недостаткам триангуляционного метода измерения можно отнести необходимость в изготовлении дополнительной оснастки и шаблонов, влияние состояния поверхности на точность измерения. Точность измерения лопаток находится в диапазоне 0,01…0,015 мм (без переустановки детали) [4]. При переустановке лопатки с хвостовиком ласточкин хвост точеного типа отклонения профиля достигают до 0,02 мм (рис.3).

Используемые методы не позволяют производить контроль лопаток с высокой точностью геометрии профиля пера, поскольку точность этих методов оказывается на уровне требований по точности к лопаткам или ниже. В связи с этим имеет место острая необходимость в разработке новых методов контроля геометрических параметров лопаток.

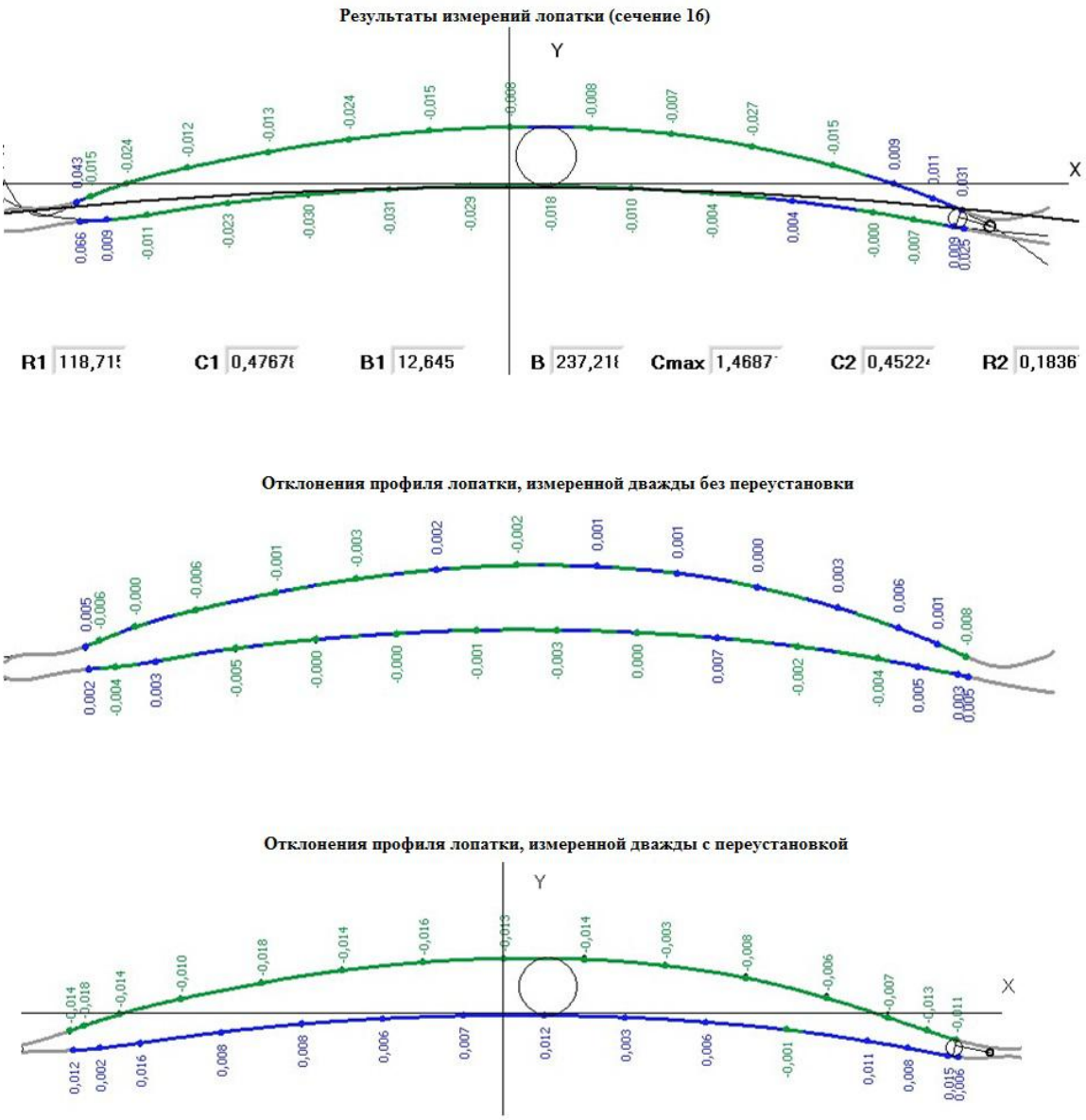


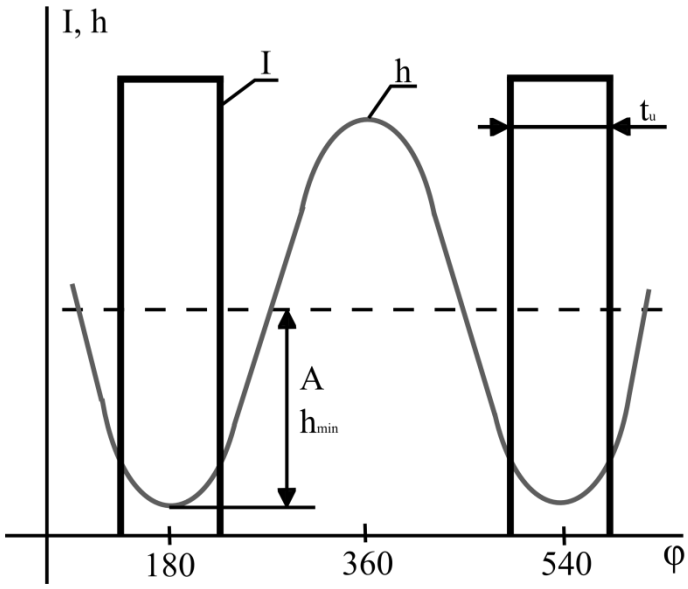
Рис. 3. Результаты измерений лопатки 5 ступени КВД изделия ПД-14

4. Анализ преимуществ способа прецизионной ЭХО

Прецизионная ЭХО с согласованной вибрацией электрода-инструмента и подачей импульсов технологического тока, позволяет осуществлять обработку при минимально возможном значении межэлектродного зазора, за счет чего достигается хорошая избирательность процесса (рис.4). В паузах между импульсами растворения 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: эффективная эвакуация продуктов электрохимических реакций вследствие возникновения поршневого эффекта при вибрации электрода, возможность безопасной работы на малых МЭЗ порядка 10…50 мкм при высоких плотностях тока [5]. Все это позволяет улучшить избирательность процесса обработки и точность копирова-

ния, увеличить производительность и снизить шероховатость поверхности, вследствие высокой локализации процесса и достижения значительных плотностей тока.



I – сила тока, А; h – величина МЭЗ, мм; А – амплитуда вибрации, мм;
t_u – длительность импульса, мс; φ – фаза подачи импульса, В

Рис. 4. Схема траектории движения ЭИ и подачи импульсного тока

Выбор ЭХО с синхронизированной вибрацией электродов-инструментов и подачей импульсов тока для формообразования пера лопаток обусловлен не только преимуществами данного способа обработки, представленными выше, но и возможностью сформировать все элементы проточной части лопатки за одну операцию.

Для реализации данного способа в ОАО ИНТЦ «Искра» изготовлены станки «Искра-38.1» (рис.5) и «Искра-38.2» (рис.6), для двухсторонней ЭХО, в которых, помимо указанного алгоритма работы, имеется возможность регулирования технологических параметров для каждого электрода-инструмента.

Данный способ обработки позволяет производить одновременное формообразование пера и прикомлевого участка лопатки с параметрами точности ±0,02 мм и шероховатостью соответствующей 8…10 классу (рис.7).

Рис. 5. Электрохимический станок «Искра-38.1»

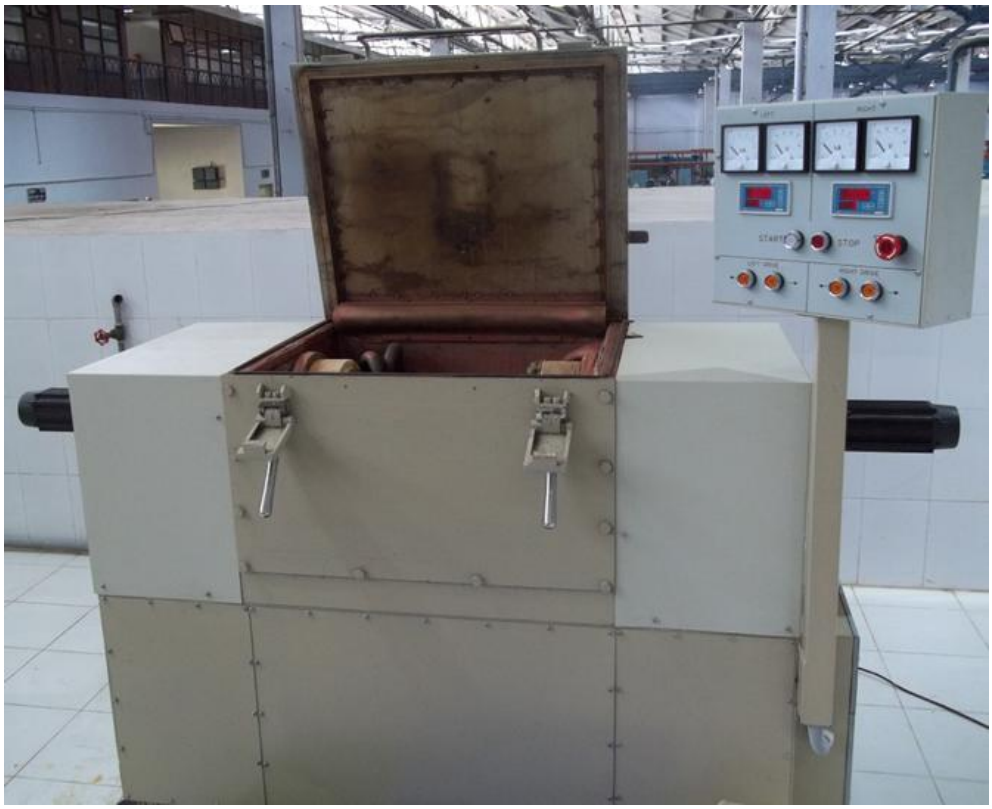


Рис. 6. Электрохимический станок «Искра-38.2»

Рис. 7. Лопатки КВД изделия ПД-14, изготовленные по предлагаемой технологии

5. Разработка варианта комплексной технологии изготовления прецизионных лопаток

В разрабатываемом технологическом процессе обработка пера и прикомлевого участка осуществляется методом ЭХО с последующим электролитно-плазменным полированием, ионно-плазменным упрочнением и, при необходимости, нанесением эрозионностойких покрытий (рис.8).

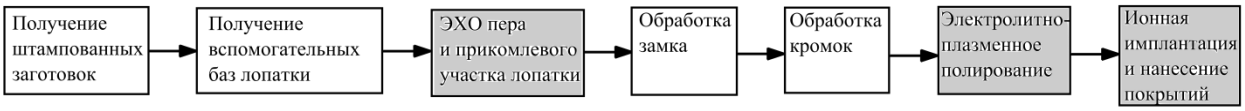


Рис. 8. Разрабатываемая технология изготовления прецизионных лопаток

Одновременное формообразование пера и прикомлевого участка осуществляется путем применения прецизионной ЭХО с вибрацией электродов-инструментов и импульсным током.

Для повышения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств лопаток предлагается последующее электролитно-плазменное полирование и ионно-плазменное упрочнение [6].

Исследования в данной области проводятся в сотрудничестве со специалистами предприятия ООО "НПП "Уралавиаспецтехнология".

Применение электролитно-плазменного полирования связано с необходимостью удаления поверхностных пленок и микрорастравов, возникающих при ЭХО, глубина которых может достигать 1 мкм. Электролитно-плазменное полирование позволяет исключить появление прижогов в поверхностном слое, характерных для ручного полирования [7]. Общий вид установки для электролитно-плазменной обработки представлен на рис.9.

В качестве упрочняющей технологии будет использоваться технология ионной имплантации азотом. На рис.10 представлена комплексная система реализации гибридных технологий ионно-лучевой и плазменной модификации поверхностных слоев материалов.

В разрабатываемом технологическом процессе исключено применение механических методов обработки пера лопатки и ручные шлифовальные и полировальные операции.

Рис. 9. ЭПП-250 установка электролитно-плазменной обработки

Рис. 10. «Виктория-2» комплексная система реализации гибридных технологий ионно-лучевой и плазменной модификации поверхностных слоев материала

В настоящее время ведутся работы по оптимизации технологии изготовления лопаток изделий ПД-14, ВК-2500, а также исследование влияния параметров основных операций обработки пера на показатели качества детали, структурный состав поверхностного слоя материала и эксплуатационные свойства лопаток.

Заключение

Применение прецизионной ЭХО для обработки пера и прикомлевого участка лопаток позволит достичь необходимую точность деталей, а также исключить из технологического процесса слесарно-полировальные операции. Последующее электролитно-плазменное полирование необходимо для удаления поверхностных оксидных пленок, повышения качества поверхности. Ионно-плазменное упрочнение и нанесение покрытия приведет к улучшению эксплуатационных свойств лопаток.

Внедрение предлагаемой технологии в процесс производства прецизионных лопаток гарантирует получение деталей с заданной точностью, качеством поверхности и эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Уваров Л.Б. Проектирование технологических процессов производства лопаток компрессора авиадвигателей: учеб. пособие. Ярославль: Изд-во Ярославск. политех. ин-та, 1987. 80 с.
2. Амирханова Н.А, Зайцев А.Н., Зарипов Р.А. Электрохимическая размерная обработка материалов в машиностроении: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2004. 258 с.
3. Зарипова Л.З. Контроль геометрических размеров и ориентирование литых лопаток турбины // V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009» (Казань, 12-13 октября 2009 г.). Казань, КГТУ, 2009. С. 372-376. Режим доступа: http://obrazovat.ru/tw_files2/urls_2/39/d-38070/7z-docs/20.pdf (дата обращения 05.03.2014).
4. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В., Менделеев В.Я. Экспериментальный анализ погрешности измерения триангуляционного метода в задачах технологического контроля профиля поверхности сложной формы // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 9. Режим доступа: http://engjournal.ru/articles/912/912.pdf (дата обращения 05.03.2014).
5. Морозов Б.И. Способ электрохимической обработки вибрирующим катодом: а.с. 260787 СССР. 1970. Бюл. № 4.
6. Смыслов А. М., Быбин А. А., Невьянцева Р. Р. Влияние ионной имплантации и плазменной поверхностной обработки на эксплуатационные характеристики жаропрочного никелевого сплава // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 3. С. 29-34.
7. Плотников Н. В., Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. № 4. С. 90-95.
8. Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д., Яценко В.К., Качан А.Я., Цивирко Э.И., Беликов С.Б., Орлов М.Р., Замковой В.Е., Мозговой В.Ф., Рубель О.В. Техноло-

гическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. В 2 ч. Ч. 2. Лопатки турбин. Запорожье : Мотор Сич, 2007. 496 с.
9. Павлинич С.П. Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2008. Т. 11, № 2 .С. 105-115.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

About the problems and perspectives of making precision compressor blades

 # 04, April 2014

DOI: 10.7463/0414.0705085

[1]V. E. Galiev, [2]D. Z. Fatkullina, [3]D. R. Tamindarov

[1]JSC Innovative Scientific Technological Center "Iskra", Ufa, 450008, Russia

[2]OOO "SKTB NEFTEGAZMASH" Ufa, 450059, Russia

[3]OOO "NPP Uralaviaspetctehnologiya" Ufa, 450027, Russia

ufa-iskra@yandex.ru

dilyarochkaf@list.ru

tamdamir@yandex.ru

The problems of manufacturing blades with high precision profile geometry are considered in the article. The variant of the technology under development rules out the use of mechanical processing methods for blades airfoil. The article consists of an introduction and six small sections.

The introduction sets out the requirements for modern aircraft engines, makes a list of problems arisen in the process of their manufacturing, and marks the relevance of the work.

The first section analyzes the existing technology of precision blades. There is an illustration reflecting the stages of the process. Their advantages and disadvantages are marked.

The second section provides an illustration, which shows the system-based blades used in the manufacturing process and a model of the work piece using the technology being developed. An analysis of each basing scheme is presented.

In the third section we list the existing control methods of geometrical parameters of blades airfoil and present the measurement error data of devices. The special attention is paid to the impossibility to control the accuracy of geometrical parameters of precision blades.

The fourth section presents the advantages of the electrochemical machining method with a consistent vibration of tool-electrode and with feeding the pulses of technology current over the traditional method. The article presents data accuracy and surface roughness of the blades airfoil reached owing to precision electrochemical machining. It illustrates machines that implement the given method of processing and components manufactured on them.

The fifth section describes the steps of the developed process with justification for the use of the proposed operations.

Based on the analysis, the author argues that the application of the proposed process to manufacture the precision compressor blades ensures producing the items that meet the requirements of the drawing.

Publications with keywords: Compressor blades, precision electrochemical machining, electrolytic-plasma polishing, ion-plasma hardening
Publications with words: Compressor blades, precision electrochemical machining, electrolytic-plasma polishing, ion-plasma hardening

References

1. Uvarov L.B. *Proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva lopatok kompressora aviadvigateley* [Design and manufacturing processes of the compressor blades of aircraft engines]. Yaroslavl', YPI Publ., 1987. 80 p. (in Russian).
2. Amirkhanova N.A, Zaytsev A.N., Zaripov R.A. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka materialov v mashinostroenii* [Electrochemical machining materials in mechanical engineering]. Ufa, UGATU Publ., 2004. 258 p. (in Russian).
3. Zaripova L.Z. [Controlling the size and geometric orientation of cast turbine blades]. *5 Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki "ANTE-2009"* [Proc. of the 5th All-Russian Scientific Conference "Problems and prospects of the development of aviation, land transport and power engineering "Ante-2009"], Kazan', 12-13 October, 2009. Kazan', KSTU, 2009, pp. 372-376. Available at: http://obrazovat.ru/tw_files2/urls_2/39/d-38070/7z-docs/20.pdf , accessed 05.03.2014. (in Russian).
4. Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Zhivotovskiy I.V., Mendeleev V.Ya. [Experimental analysis of the instrument uncertainty of triangulation method in the problems of process control of the complex form surface profile*]. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii - Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 9. Available at http://engjournal.ru/eng/catalog/pribor/optica/912.html , accessed 05.03.2014. (in Russian).
5. Morozov B.I. *Sposob elektrokhimicheskoy obrabotki vibriruyushchim katodom* [The method of electrochemical machining with the use of vibrating cathode]. Author's certificate USSR, no. 260787, 1970. (in Russian).
6. Smyslov A.M., Bybin A.A., Nev'yantseva R.R. [Effect of ion implantation and plasma surface treatment on operational characteristics of heat-resistant nickel alloy]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2007, no. 3, pp. 29-34. (in Russian).
7. Plotnikov N. V., Smyslov A. M., Tamindarov D. R. [To a question on model of electrolytic-plasma polishing]. *Vestnik UGATU*, 2013, no. 4, pp. 90-95. (in Russian).
8. Boguslaev V.A., Muravchenko F.M., Zhemanyuk P.D., Yatsenko V.K., Kachan A.Ya., Tsivirko E.I., Belikov S.B., Orlov M.R., Zamkovoy V.E., Mozgovoy V.F., Rubel' O.V. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. V 2 ch. Ch. 2. Lopatki turbin* [Technological support of performance characteristics of parts of GTE. In 2 parts. Pt. 2. Turbine blades]. Zaporozh'e, Motor Sich Publ., 2007. 496 p. (in Russian).
9. Pavlinich S.P. [The outlook for application of pulse electrochemical machining in gas turbine engine production]. *Vestnik UGATU*, 2008, vol. 11, no. 2, pp. 105-115. (in Russian).