

УДК 621.452.3:621.35

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК

В. Э. ГАЛИЕВ¹, Д. З. ФАТКУЛЛИНА²

¹ ufa-iskra@yandex.ru, ² dilyarochkaf@list.ru

^{1,2} ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ),

¹ ОАО Инновационный научно-технологический центр «ИСКРА» (ИНТЦ «Искра»),

² ООО «Специальное проектно-конструкторское бюро нефтегазового оборудования» (СПКБ Нефтегазмаш),

Поступила в редакцию 10 апреля 2014 г.

Аннотация. На основе анализа технологических процессов изготовления прецизионных лопаток представлен вариант технологии, в котором исключена механическая обработка пера лопаток.

Ключевые слова: прецизионная электрохимическая обработка; электролитно-плазменное полирование; ионно-плазменное упрочнение

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 (BT6, BT8M) и жаропрочных сталей (ЭП-718, ЭИ-787) 1 класса точности, в которых отклонения координат точек профиля должно быть не более $\pm 0,02$ мм.

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;
- низкая точность базирования при обработке и контроле;
- необходимость ручного полирования поверхности пера лопаток;
- низкая точность существующих средств измерения;

- нестабильное качество процесса изготовления и упрочнения тонкостенных лопаток.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Актуальность работы по разработке комплексной технологии изготовления прецизионных лопаток связана с необходимостью высокопроизводительного изготовления лопаток существующих и перспективных изделий с повышенной точностью, качеством поверхностного слоя и эксплуатационными характеристиками на базе технологий, исключающих применение ручных шлифовальных и полировальных работ.

2. 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 трастовой поверхности полки, заданная точность выполнения этих элементов.

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

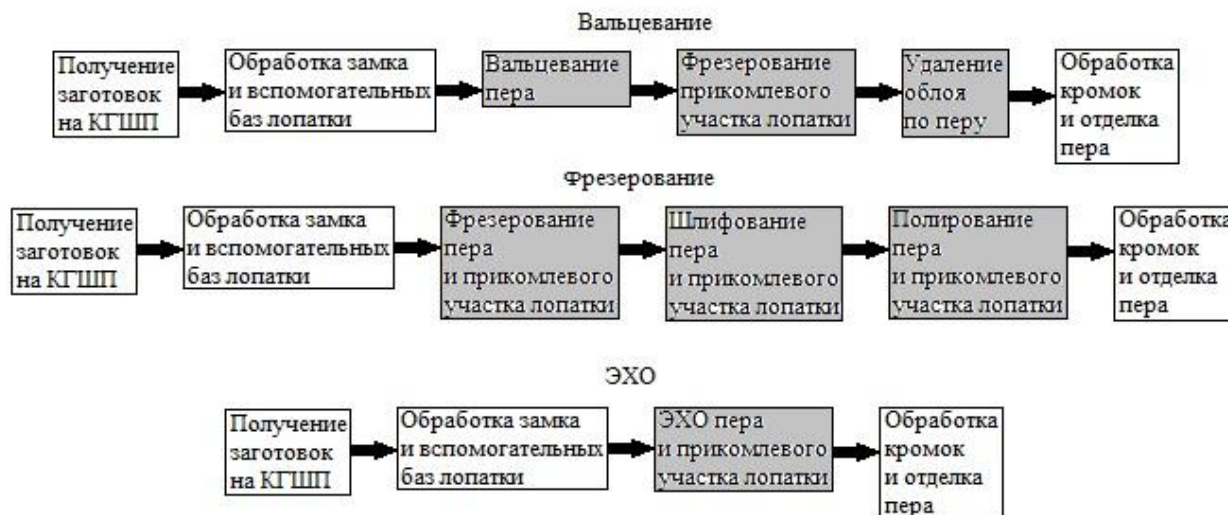


Рис.1. Существующие технологические процессы изготовления прецизионных лопаток

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, ВТЗ-1) и площади лопаток, высокая стоимость оснастки [1].

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.

Основные достоинства ЭХО [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.

3. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ 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 базирования 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 перенастраиваемую 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).

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

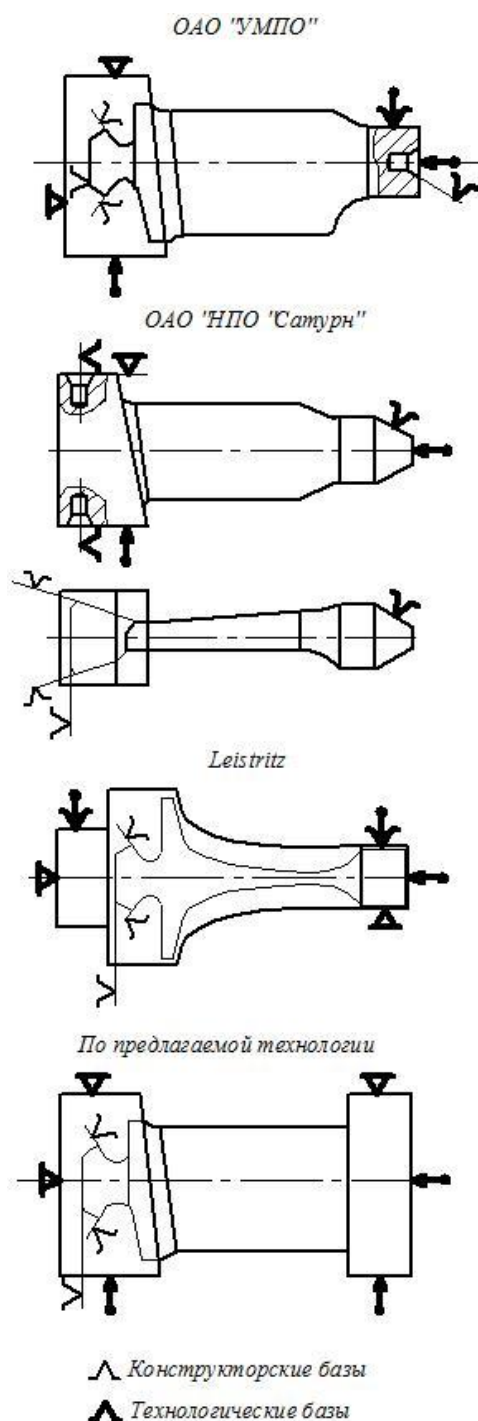


Рис. 2. Системы базирования лопаток в процессе изготовления

получения пера лопатки. Далее произойдет 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 относительно 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 Leistrütz (Германия), заготовкой лопатки является штамповка. На первом этапе изготовления производится обработка массивной бобышки, по которой происходит базирование заготовки на следующих операциях. Профиль пера получают методом ЭХО. Далее происходит обработка замка лопатки, которую для большей жесткости предварительно заливают легкоплавким сплавом в брикет. Последний этап изготовления лопаток по рассматриваемому технологическому процессу – обрезка. Данная технология также основана на принципе постоянства баз. Достоинством 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.

4. 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 параметров 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;
- Стax, 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.

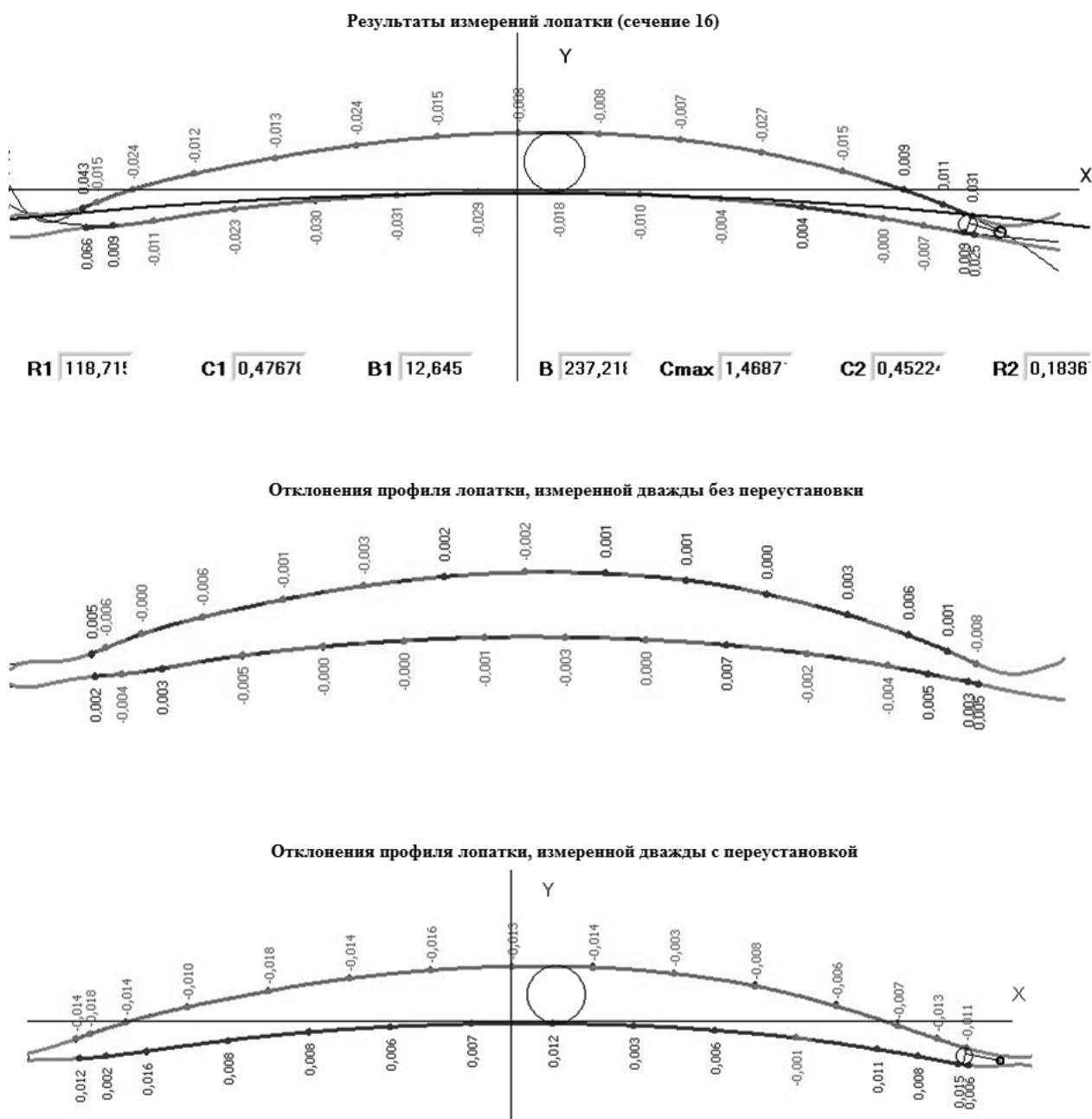


Рис. 3. Результаты измерений лопатки 5 ступени КВД изделия ПД-14

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 точности требования к лопаткам или ниже. В связи с этим имеет место острая необходимость в разработке

новых методов контроля геометрических параметров лопаток.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ЭХО

Прецизионная ЭХО с согласованной вибрацией электрода-инструмента и подачей импульсов технологического тока (рис. 4), позволяет осуществлять обработку при минимально возможном значении межэлектродного зазора, за счет чего достигается хорошая избирательность процесса. В паузах между импульсами растворе-

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

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

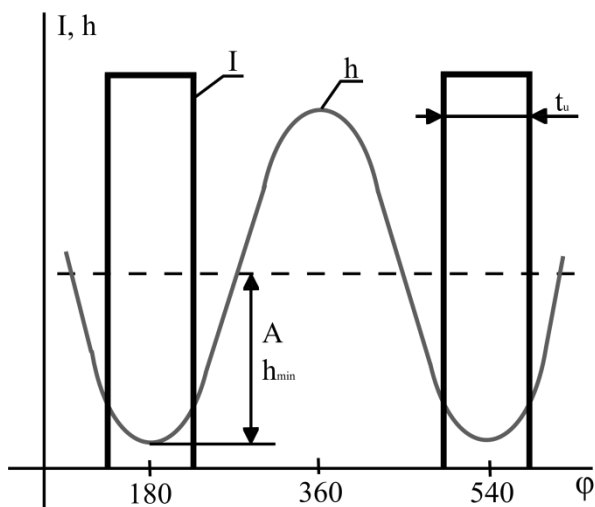


Рис. 4. Схема траектории движения ЭИ и подачи импульсного тока: I – сила тока, А; h – величина МЭЗ, мм; A – амплитуда вибрации, мм; t_u – длительность импульса, мс; φ – фаза подачи импульса, В

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.



Рис. 5. Электрохимический станок «Искра-38.1»



Рис. 6. Электрохимический станок «Искра-38.2»

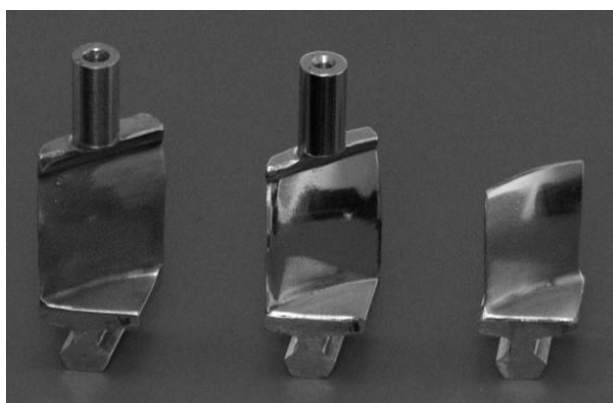


Рис. 7. Лопатки КВД изделия ПД-14, изготовленные по предлагаемой технологии

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



Рис. 8. Разрабатываемая технология изготовления прецизионных лопаток

6. РАЗРАБАТЫВАЕМАЯ ТЕХНОЛОГИЯ 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 эрозиянностойких покрытий (рис. 8). Базирование заготовки производится по принципу, указанному выше.

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" [7].

Применение электролитно-плазменного полирования связано с необходимостью удаления поверхностных пленок и микрорастратов, возникающих при ЭХО, глубина которых может достигать 1 мкм. Электролитно-плазменное полирование позволяет исключить появление прижогов в поверхностном слое, характерных для ручного полирования. 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.

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.



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

ВЫВОДЫ

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: ЯПИ, 1987. 80 с. [L. B. Uvarov. *Design and manufacturing processes of the compressor blades of aircraft engines*, (in Russian): textbook. Yaroslavl: YAPI, 1987.]
2. **Амирханова Н. А., Зайцев А. Н., Зарипов Р. А.** Электрохимическая размерная обработка материалов в машиностроении: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2004. 258 с. [N. A. Amirhanova, A.N. Zaitsev, R.A. Zaripov. *Electrochemical machining materials in mechanical engineering*, (in Russian): textbook. Ufa: USATU, 2004.]
3. **Зарипова Л.З.** Контроль геометрических размеров и ориентирование литых лопаток турбин [Электронный ресурс]. URL: http://obrazovat.ru/tw_files2/urls_2/39/d-38070/7z-docs/20.pdf (дата обращения 25.11.2014). [L. Z. Zaripova (2013, Nov. 25). *Control of the geometric dimensions and orientation of cast turbine blades* [Online], (in Russian). Available: <http://engjournal.ru/articles/912/912.pdf>]
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. [Электронный ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/articles/912/912.pdf> (дата обращения 05.03.2014). [N.V. Baryshnikov, D.G. Denisov, I.V. Givotovsky, V.Y. Mendeleev (2014, March. 05). *Experimental analysis of measurement error triangulation method in problems of process control profile for irregular surfaces* [Online], (in Russian). Available: <http://engjournal.ru/articles/912/912.pdf>]
5. **А. с. 260787** СССР, МКИ2 В 23 Р 1/04. Способ электрохимической обработки вибрирующим катодом / Б. И. Морозов. Опубл. в БИ №4, 1970. [B. I. Morozov. *The method of electrochemical machining vibrating cathode*: A.s. 260787 USSR, IKI2 B23 P 1/04, (in Russian). Publ. in BI no. 4, 1970.]
6. **Смыслов А. М.** Влияние ионной имплантации и плазменной поверхностной обработки на эксплуатационные характеристики жаропрочного никелевого сплава / А. М. Смыслов, А. А. Быбин, Р. Р. Невьянцева // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 3. С. 29–34. [A. M. Smyslov, A.A. Bybin, R.R. Nevyantseva, "Effect of ion implantation and the plasma surface treatment on the performance of heat-resistant nickel fusion," (in Russian), *Physics and chemistry of materials processing*, no. 3. pp. 29-34. 2007.]
7. Сайт «НПП УАСТ». Упрочнение и специальные методы обработки. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nppuast.com/processing.htm> (дата обращения 20.03.2014). [Site *NPP UAST*. (2014, March. 20). *Hardening and special processing* [Online], (in Russian). Available: <http://www.nppuast.com/processing.htm>]
8. **Богуслаев В. А.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбин. Запорожье: Мотор Сич, 2007. 496 с. [V. A. Boguslayev. *Technological support performance of details GTE. Turbine blades*, (in Russian). Zaporozhye: Motor Sich, 2007.]
9. **Павлинич С. П.** Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 2. С. 105–115. [S.P. Pavlinich, "Perspectives of application of impulse electrochemical machining of details in the production of gas turbine engines," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 11, no. 2 (29), pp. 105-115, 2011.]

ОБ АВТОРАХ

ГАЛИЕВ Владимир Энгелевич, доц. каф. технологии машиностроения; гл. технолог ИИТЦ «Искра». Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1985). Канд. техн. наук (МГТУ им. Баумана, 1990). Иссл. в обл. технол. и оборуд. электрофизико-технических методов обработки.

ФАТКУЛЛИНА Диляра Зинуровна, асп. каф. технологии машиностроения; инж.-конст. СПКТБ Нефтегазмаш. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. технол. электрофизико-технических методов обработки.

METADATA

Title: Problems and perspectives of manufacturing precision compressor blades.

Authors: V. E. Galiev, D. Z. Fatkullina.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia,

OJSC Innovation of Scientific and Technological Center "ISKRA" (OJSC ISTC "Iskra"), Russia

LLC "Special draft design and technological bureau oil and gas equipment " (LLC "SDDTB Neftegasmash"), Russia

Email: dilyarochkaf@list.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 97-105, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The problems of manufacturing blades with high precision profile geometry are considered in the article. Existing processes of making precision blades are analyzed. Based systems that are used in the manufacturing process of the blades are illustrated. Their advantages and

disadvantages are marked. Offered the option to install the blade pre-form, the main advantage is the ease of database forms. The special attention to the difficulties of control geometric parameters pen blades is paid. Represented developed technology that excluded the use of mechanical processing methods pen blades. Based on this analysis, it is argued that the application of the proposed process of manufacturing precision compressor blades ensures receipt of the items that meet the requirements of the drawing.

Key words: precision electrochemical machining; electrolytic-plasma polishing; ion-plasma hardening

About authors:

GALIEV, Vladimir Engelevich, Prof., dept. of mechanical engineering. Dipl. engineer-mechanic (UAU, 1985). Cand. of Tech. Sci. (MSTU Bauman, 1990). Research in the field of technology and equipment electrophysic-technical processing methods.

FATKULLINA, Dilyara Zinurovna, Postgrad. (PhD) Student, dept. of mechanical engineering. Dipl. engineer by profession "machinery and technology of highly efficient processes" (USATU, 2010). Research in the field of technology and equipment electrophysic-technical processing methods.