

## Особенности применения совмещенной скоростной электроэрозионно-лазерной обработки отверстий малых диаметров в деталях газотурбинных двигателей с керамическим покрытием

В. Ф. Макаров, О. А. Сибирева, \*М. В. Песин, С. П. Никитин, В. В. Карманов

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
г. Пермь, 614990, Россия, \*e-mail: [m.pesin@mail.ru](mailto:m.pesin@mail.ru)

Поступила в редакцию 27.03.2020

После доработки 30.06.2020

Принята к публикации 02.07.2020

Представлены материалы исследований нового процесса совмещенной электроэрозионно-лазерной обработки отверстий малых диаметров в деталях газотурбинных двигателей с керамическим покрытием. Раскрывается механизм обеспечения высокой производительности и качества обработки отверстий малых диаметров в деталях газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на основе применения совмещенной скоростной электроэрозионно-лазерной обработки с использованием полого вращающегося электрода-инструмента и внутренней прокачки рабочей среды.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка, лазерная обработка, отверстия малых диаметров, полый вращающийся электрод, давление прокачки, скорость вращения электрода

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.4045913

### ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой развития отечественного машиностроения на современном этапе является повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции. В свою очередь конкурентоспособность изделия определяется его качеством, надежностью работы в эксплуатации и ценой изделия. Эти параметры изделия обеспечиваются не только конструктивно, но, прежде всего, в процессе производства изделия, на технологических операциях изготовления различных деталей. На современном этапе развития промышленного производства четко проявляется тенденция интенсификации процессов обработки, определяющей выходные параметры деталей машин [1, 2]. При этом основным критерием оптимизации технологических процессов является максимальная производительность с ограничением по качеству обработанной поверхности (уровень шероховатости, глубина распространения прижогов, наличие микротрещин и т.д.) и допустимым режимом эксплуатации оборудования и инструмента. Сегодня это наиболее актуально для такого особого класса сложнейших машин и механизмов, как газотурбинные двигатели (ГТД) для авиации, наземных энергетических и газоперекачивающих установок, например, для обработки огромной номенклатуры деталей и узлов нового авиационного двигателя ПД14 для самолетов гражданской авиации МС-21, а также модификации двигателя для газоперекачивающих и энергетических установок.

В процессе механической обработки деталей ГТД помимо видоизменения формы и размеров заготовки происходит формирование особых свойств поверхностного слоя, его макро- и микроструктуры, что непосредственным образом влияет на усталостную прочность, долговечность деталей и в конечном счете на надежность и ресурс работы газотурбинных двигателей.

Для обеспечения требуемых высоких параметров качества поверхностного слоя, надежности и долговечности работы деталей и узлов ГТД при одновременном повышении производительности и снижении себестоимости их изготовления требуются разработка и совершенствование этих процессов.

Современное машиностроительное производство ставит перед руководством и технологическими службами предприятий задачи по разработке и внедрению экономически эффективных технологий и оборудования, которые бы снижали трудоемкость обработки, совмещали несколько трудоемких операций, сокращали количество переустановок детали при обработке, уменьшали цикл изготовления деталей.

Одной из сложных и наукоемких групп деталей современного авиадвигателестроения являются лопатки газотурбинных двигателей. Они работают в тяжелых условиях, при высоких температурах (1200–1400°С), поэтому для их изготовления используются жаропрочные сплавы на никелевой основе. Современные охлаждаемые лопатки ГТД, как рабочая, так и сопловая, имеют чрезвычайно сложную и

развитую систему охлаждения, состоящую из внутренней полости, разделяемой перегородками, штырьков, турбулизаторов и т.д., а также отверстий малого диаметра (0,3–2 мм с допуском на диаметр 0,05–0,1 мм), выходящих в проточную часть газоздушного тракта. Отверстия создают эффект «пленочного охлаждения». Это обуславливает высокие требования к их расположению, форме, размерам и качеству.

В механическом производстве наибольшую трудоемкость представляет изготовление отверстий. В одной лопатке насчитывается до 400 охлаждающих отверстий. Отверстия расположены под острыми углами к обрабатываемой поверхности и достигают глубины до 20 диаметров.

Эти отверстия получают разными способами (сверление сверлами малого диаметра и лазерным лучом, электрохимическая, электроэрозионная обработка и др.) [3–5]. Наибольшее распространение получил метод электроэрозионной обработки (ЭЭО), так как он обеспечивает наилучшие параметры отверстия. Однако в последнее время изготовление отверстий осложняется применением дополнительного комбинированного термобарьерного керамического покрытия. Это покрытие толщиной 0,1–0,3 мм является диэлектриком, в связи с чем становится невозможным применение электроэрозионной прошивки в чистом виде. Также это приводит к использованию дополнительных малопроизводительных операций, таких как слесарная зачистка надфилями закупоренных керамикой отверстий.

Кроме того, процесс изготовления отверстий в лопатках очень трудоемкий. Связано это с применением устаревшего оборудования, на котором сейчас в основном и прошивают отверстия на моторостроительных предприятиях. Отверстия разделены на группы (ряды). Обработка отверстий ведется вертикально. Каждая группа отверстий обрабатывается в отдельном приспособлении. Производится одновременная обработка группы отверстий (до 20) электродами-инструментами (электродами) соответствующего количества, закрепленными в державке. Electroды направляются через отверстия в кондукторной планке, ориентированной относительно приспособления. Глубина обработки задается для группы отверстий одинаковая, наиболее глубокая. Минусы данной технологии в том, что много времени тратится на установку детали и на переустановку. Также, когда гребенка электродов опускается и прожигает отверстия, износ электрода-инструмента происходит не равномерно, из-за этого приходится останавливать обработку,

поднимать электроды и выравнивать их. Кроме того, для разных отверстий приходится вручную переустанавливать электроды. На обработку требуется большое количество специальной оснастки. К примеру, для оснащения одного наименования лопатки количество шифров оснастки, применяемой при электроэрозионной обработке отверстий, может доходить до 40–50 штук. Электроэрозионное оборудование указанных моделей имеет далеко не самые совершенные генераторы [6–8]. При обработке от этих генераторов образуется значительный измененный слой, в котором могут зарождаться недопустимые трещины.

Применяемые для изготовления отверстий традиционные схемы обработки (обработка отверстий рядами или группами с параллельными осями) не могут быть использованы для изготовления лопаток новой конструкции, где требуется располагать каждое отверстие под индивидуальным углом для обеспечения оптимальной работы системы охлаждения лопатки [9–12]. Такое конструктивное исполнение отверстий значительно увеличивает количество необходимой оснастки (установочных приспособлений требуется в соответствии с количеством обрабатываемых отверстий) и время обработки.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что качество поверхности охлаждающих отверстий при обработке стержневыми невращающимися электродами не столь высоко. Свидетельством тому является зарождение микротрещин в достаточно большом измененном слое.

Следовательно, разработка новой современной технологии обработки отверстий малого диаметра в лопатках ГТД является по-прежнему актуальной проблемой для авиадвигателестроительного производства. Лопатки турбины являются наиболее нагруженными, ответственными и массовыми деталями (общее количество лопаток турбин на одном двигателе может достигать 500 шт. и более), в основном определяющими эффективность, надежность и в конечном счете ресурс газотурбинных двигателей.

Лопатки турбины двигателей ПС-90А и ПД-14 изготавливаются из жаропрочных сплавов ЖС6У, ЖС6У-ВИ (равноосное литье) или ЖС32, ЖС26 (литье с направленной или монокристаллической структурой). Для организации охлаждения во внутренней полости лопаток имеются продольный канал с отверстиями в перегородке и ребра. Кроме того, на входной кромке лопатки выполнена перфорация для обеспечения пленочного охлаждения.

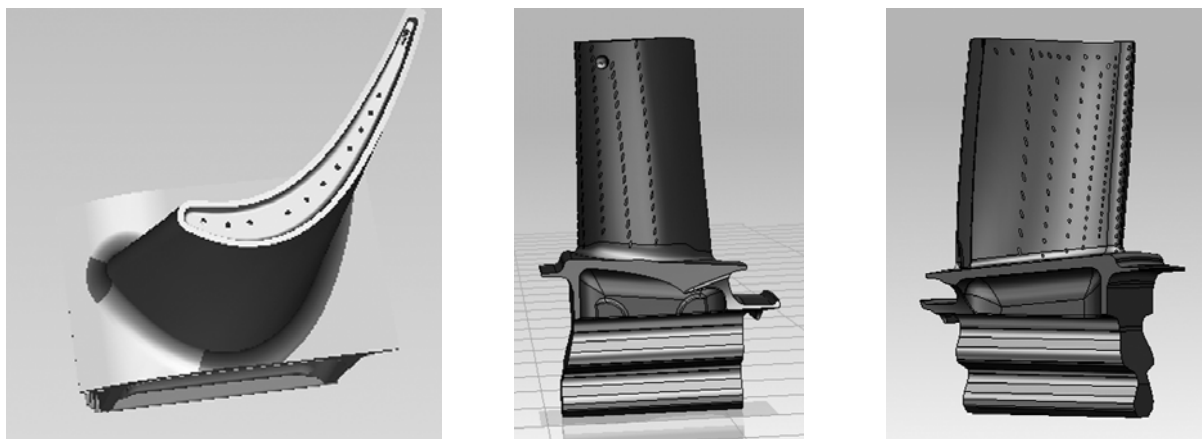


Рис. 1. Общий вид рабочих лопаток турбины 1-й ступени с перфорированными охлаждающими отверстиями.

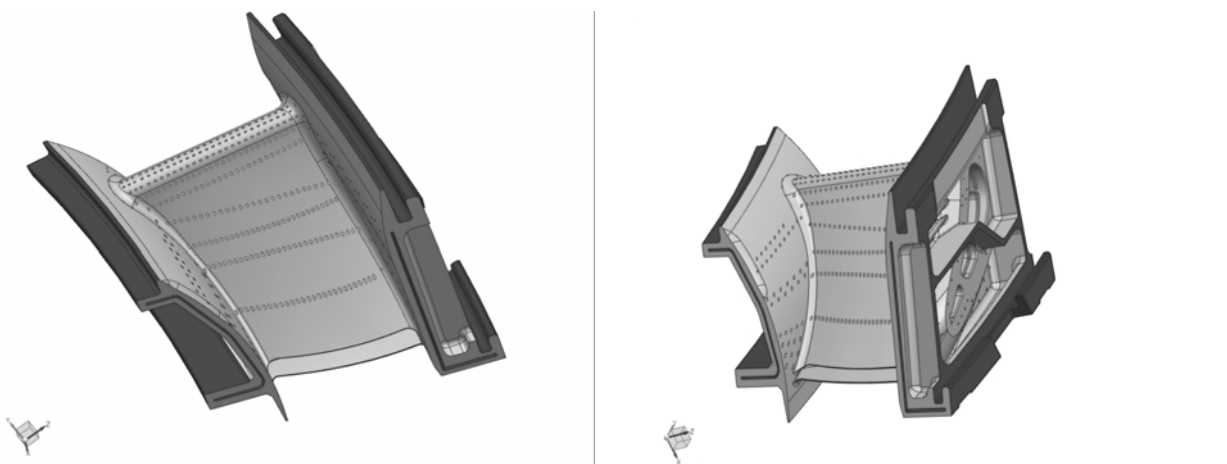


Рис. 2. Расположение базовых поверхностей и перфорационных отверстий сопловой лопатки 1-й ступени ГТД.

Рабочие лопатки турбины двигателя ПД-14 (рис. 1) изготавливаются из жаропрочных никелевых сплавов ЖС36ВИ, ВЖМ4ВИ и ВЖМ5ВИ с комплексным теплозащитным покрытием толщиной до 0,15–0,20 мм.

Для высокопроизводительной обработки перфорационных разнонаправленных отверстий различных диаметров в рабочей лопатке с керамическим покрытием в настоящее время разработаны и рекомендуются к применению высокоскоростные электроэрозионные станки с лазерной головкой и магазином электродов с использованием вращающегося электрода и высоконапорной очисткой межэлектродного зазора струей диэлектрической жидкости [13–17]. Управление станком должно осуществляться системой ЧПУ.

Всего в сопловой лопатке 1-й ступени отверстий 524, из них: диаметром  $0,55^{+0,05}$  – 377, диаметром  $0,4^{+0,05}$  – 147 отверстий (рис. 2). Наиболее ответственные детали ГТД, такие как лопатки сопловые или турбинные, работают в экстремальных условиях при температурах, близких к температуре плавления сплава. Для обеспечения долговечной и нормальной работы лопатки перфорированы отверстиями малого диаметра 0,3–2 мм с допуском на диаметр

0,05–0,1 мм, через которые продувается воздух, создающий охлаждающий эффект на рабочей поверхности, подверженной тепловому воздействию. В одной лопатке насчитывается до 400 охлаждающих отверстий. Отверстия расположены под острыми углами к обрабатываемой поверхности и достигают глубины до 20 диаметров. Для совершенствования технологии производства эти отверстия конструктивно объединены в ряды (понятие «ряд» условно, так как он может состоять из одного-двух отверстий).

Отверстия малого диаметра используются во многих деталях авиационных двигателей и их агрегатов, например, лопатках газовых турбин, кольцевых деталях турбины и камеры сгорания, в форсунках и фильтрах, экранах, деталях гидро- и пневмоагрегатов (золотники, плунжеры, дроссели, гильзы и т.д.), а также для контровки деталей крепежа и арматуры.

При прошивке отверстий полым электродом достигаются следующие технологические показатели: точность размера отверстий 0,02–0,05 мм, шероховатость поверхности 5–15 мкм, скорость прошивки 5–10 мм/мин, износ электрода-инструмента (ЭИ) – 30–50% [1].

Лазерная абляция (англ. *Laser ablation*) – метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом. При низкой мощности лазера вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов, то есть над облучаемой поверхностью образуется слабая плазма, обычно в данном случае темная, не светящаяся (этот режим часто называется лазерной десорбцией). При плотности мощности лазерного импульса, превышающей порог режима абляции, происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и светящейся плазмы вместе с разлетающимися твердыми и жидкими частицами (аэрозоля). Производится одновременная обработка группы отверстий (до 20) электродами-инструментами (электродами) соответствующего количества, закрепленными в державке. Electroды направляются через отверстия в кондукторной планке, ориентированной относительно приспособления. Материал электродов – вольфрам. В приспособлении лопатки устанавливаются на базовые поверхности, в зависимости от их конструкции. Поэтому использование такой технологии не может быть оправдано в серийном производстве. Кроме того, электроэрозионное оборудование указанных моделей имеет далеко не самые совершенные генераторы. При их обработке образуется значительный измененный слой, в котором могут зародиться недопустимые трещины [18–21].

Применяемые для изготовления отверстий традиционные схемы обработки (обработка отверстий рядами или группами с параллельными осями) не могут быть использованы для обработки лопаток новой конструкции, где требуется располагать каждое отверстие под индивидуальным углом для обеспечения оптимальной работы системы охлаждения лопатки. Такое конструктивное исполнение отверстий значительно увеличивает количество необходимой оснастки (установочных приспособлений требуется в соответствии с количеством обрабатываемых отверстий) и время обработки.

Типовой маршрут обработки включает следующие пункты [22–24]:

- точное литье (монокристалл, или метод направленной кристаллизации);
- механическая обработка элементов лопаток;
- полирование пера;
- электроэрозионная обработка перфорационных охлаждающих отверстий;
- гидроимпульсная обработка внутренней полости и отверстий;

– нанесение теплозащитного покрытия на перо и полки (газовоздушный тракт);

– окончательная обработка пера – удаление наплывов, обеспечение шероховатости (полирование, виброабразивная обработка);

– контроль отверстий продувом воздуха.

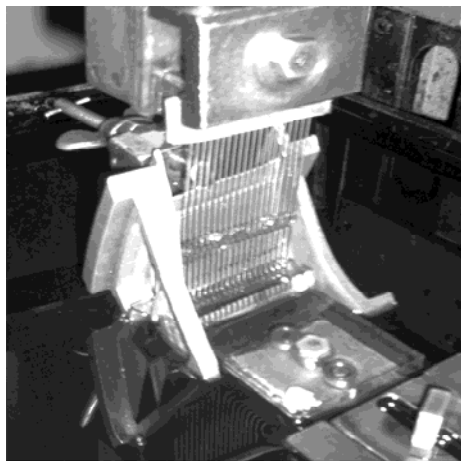
При использовании существующей технологии обработки возникают проблемы, связанные с конструкторскими изменениями отверстий. Так, по существующей технологии сначала производится электроэрозионная обработка отверстий по заданным размерам на окончательно сформированном пере лопатки, а затем наносится теплозащитное покрытие, состоящее из нескольких слоев с окончательной толщиной 0,2–0,3 мм. При этом выявлено, что при контроле лопаток продувом до покрытия расход воздуха находится в пределах допуска, а после покрытия – не достигает нормативного значения. Исследования показывают, что наносимое покрытие уменьшает диаметр отверстий, вследствие чего сокращается расход продуваемого через них воздуха и снижается эффект охлаждения лопатки [25–27].

Другой немаловажной проблемой является обеспечение заданного координатного расположения отверстий относительно лопатки для максимального достижения эффекта охлаждения. В перспективе планируется формирование отверстий более сложной нецилиндрической формы для увеличения эффекта пленочного охлаждения.

В последнее время на смену станкам 4Г721, которые использовали групповые электроды для прошивки отверстий (рис. 3), поступили электроэрозионные копировально-прошивные станки с ЧПУ модели *ELOX MONDO STAR 2* швейцарской фирмы *AGIE* (рис. 4).

Схема обработки та же, что на 4Г721. Глубина обработки задается по вертикальной оси *Z* в ЧПУ станка. Приобретенные в 2001 году новые электроэрозионные станки модели *Agiatron Mondo 2* производства фирмы *AGIE* (Швейцария) требуют такого же количества оснастки (установочные приспособления, кондукторы, державки), что и станки моделей 4В721 и 4Г721. Производительность обработки на них увеличивается незначительно. Плюсом использования этого оборудования является то, что достигается стабильное качество поверхности отверстий.

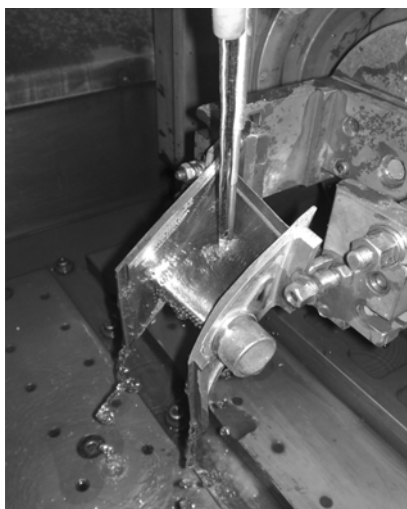
Минимизация количества оснастки произошла при применении электроэрозионных прошивочных станков ЧПУ, использующих принцип «супердрели» моделей *TSH-600* и *TSH-1000* тайваньской фирмы *TOPEDM*. В настоящее время внедрена обработка на новых



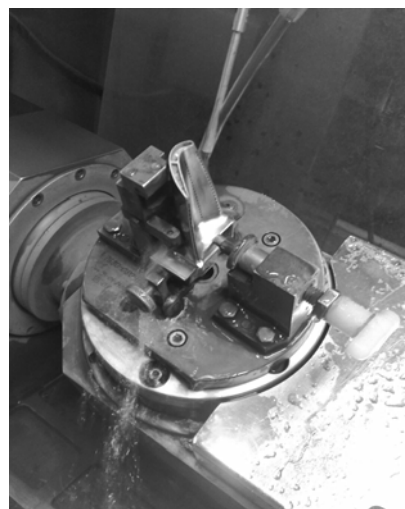
**Рис. 3.** Групповые электроды для прошивки отверстий на электроэрозионном копировально-прошивочном станке 4Г721.



**Рис. 4.** Электроэрозионный копировально-прошивочный станок с ЧПУ модели *ELOX MONDO STAR 2* швейцарской фирмы *AGIE*.



(а)



(б)

**Рис. 5.** Обработка отверстий на станке *TSH-1000* в сопловой (а) и рабочей (б) лопатках турбины одиночным полым электродом.

высокопроизводительных станках с ЧПУ типа «супердрель» моделей *TSH-600* и *TSH-1000* (рис. 5).

Рассматриваемые станки имеют пятикоординатную систему позиционирования детали и однокоординатный электроэрозионный инструмент, приводимый в действие высокочастотным электродвигателем переменного тока с низкоинерционным ротором. Генератор вырабатывает импульсы ультравысокой частоты, и в его конструкции используются самые последние электронные технологии на интегральных схемах. В этом оборудовании реализована одна из разновидностей электроэрозионной обработки – высокоскоростное сверление (*HSD*), при котором обработка отверстия ведется с помощью трубчатого электрода, через который под высоким давлением прокачивается деионизированная вода.

Станок имеет семь управляемых осей, систему автоматической смены отдельно инструментов и отдельно направляющих. Обра-

ботка производится последовательно по одному отверстию по программе. Материал электрода – латунная трубка. Лопатки устанавливаются в приспособлении на базовые поверхности либо на шесть базовых точек. Приспособление закрепляется на поворотном-качающемся столе и ориентируется относительно осей станка выкаткой по базовой поверхности рычажно-механическим индикатором. Для обработки всех отверстий в лопатке используется одно или два приспособления.

Наиболее производительными прошивочными станками сегодня являются электроэрозионные прошивочные станки с ЧПУ типа «супердрель» модели *HSD6-III* английской фирмы *WinbroGroupTechnologiesLtd* (рис. 6). На станке предусмотрена возможность скоростного электроэрозионного сверления отверстий диаметром до 3 мм. После приобретения ОАО «ПМЗ» четырех электроэрозионных станков с ЧПУ (два в 2009 г. и два в 2013 г.) модели *HSD6-III* английской фирмы *Winbrogroup* у



Рис. 6. Общий вид станка HSD6-III (а) и наладка станка на обработку отверстий в лопатке одиночным полым электродом (б).

предприятия появилась возможность изготавливать перфорационные отверстия в лопатках на мировом уровне. Эти станки специально разработаны для лопаточного производства и оснащены рядом специальных функций, необходимых при изготовлении отверстий в лопатках.

Станок имеет семь управляемых осей, которые обеспечивают прожиг отверстий под различными углами и с различными диаметрами (рис. 7) без дополнительных приспособлений за одну установку.

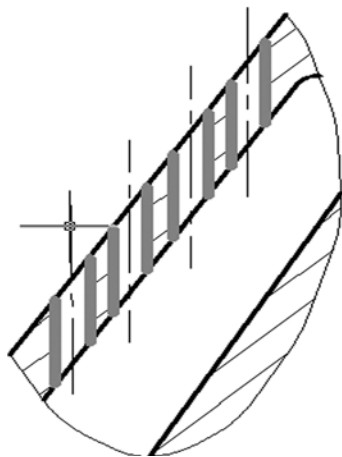


Рис. 7. Общий вид обработанных отверстий, расположенных под углом.

Станок оснащен системой автоматической смены инструментов и системой *Renishaw* для контроля лопатки и отверстий.

Система автоматической смены инструментов представляет собой сложный блок, состоящий из тубы для загрузки электродов (до 20 шт.), зажимных цанг и направляющей, конфигурация которой может быть как стандартной цилиндрической формы, так и выполняться в зависимости от особенностей профиля детали.

Перед обработкой деталь закрепляется в установочном приспособлении (с помощью

резьбовой шпильки, проходящей через внутреннюю полость) и обмеряется измерительным щупом *Renishaw* по шести точкам, при этом происходит привязка реального профиля лопатки к управляющей программе, составленной на основе геометрической модели. После обмеров автоматически производится корректировка программы, и на станок устанавливается одноэлектродный инструмент. После прошивки всех отверстий одноэлектродный инструмент заменяется на контрольное приспособление с измерительным лазером. Лазерный луч находит каждое из обработанных отверстий, определяются диаметр отверстия и его координаты. На выполнение замеров по одному отверстию затрачивается 15 секунд. По результатам замеров формируется протокол.

В связи с тем что детали выверяются на станке непосредственно перед сверлением, то не требуются внешние данные для управления. Перед сверлением проверяется только несколько заданных конструктором точек. Процесс прямого обмера выявляет отклонение от номинальной позиции в каждой точке. Затем собранные данные математически обрабатываются, и производится расчет соответствующей коррекции сдвига и поворота детали. После введения этой коррекции деталь повторно проверяется.

Лопатка закрепляется в приспособлении за любой доступный участок таким образом, чтобы обрабатываемые поверхности были открыты и доступны для подхода инструмента. Например, рабочая лопатка закрепляется за необработанный хвостовик. Приспособление устанавливается на поворотном-качающемся столе (рис. 8).

Ориентация лопатки относительно координатной системы станка производится по шести базовым точкам. Станок ощупывает деталь с помощью щупа и сам позиционирует ее по шести

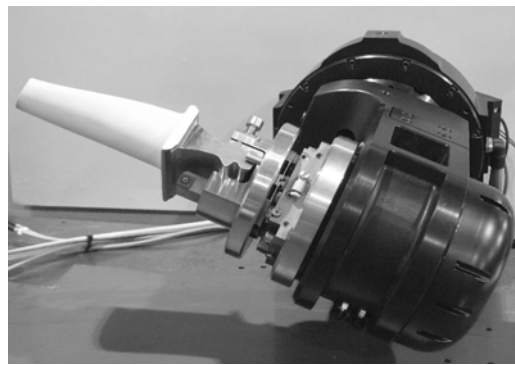
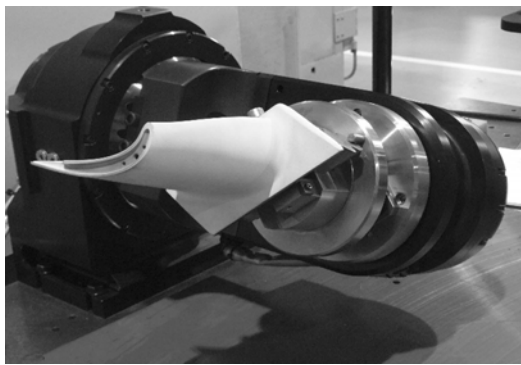
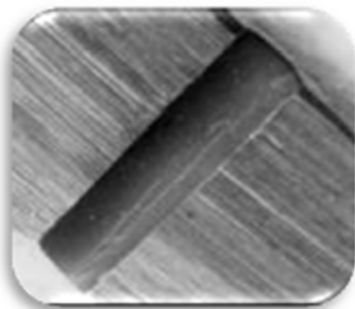


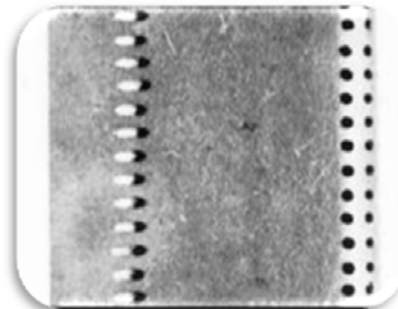
Рис. 8. Пример закрепления лопатки на обрабатывающем центре *FHDrill / Mill 800*.



(а)



(б)



(в)

Рис. 9. Отверстия цилиндрической формы (а), конические отверстия (б), система отверстий (в), обработанных на станке *HSD6-III*.

контрольным точкам, совмещая с геометрической моделью лопатки. При этом методе базирования реальный профиль лопатки совмещается с теоретическим профилем с заданной точностью. Метод базирования по шести точкам позволяет использовать простое быстросменное приспособление. При этом исключаются литейная погрешность и погрешность установки. Точность обработки отверстий до 0,02 мм.

В ЧПУ станка есть специальный программный модуль, позволяющий производить обработку отверстий в виде воронки на плоских участках (рис. 9). В настоящее время на станках внедрена обработка притупления острой кромки отверстий.

Использование новых станков с ЧПУ типа *FHDrillMill 800* позволяет реализовать изготовление нового поколения систем охлаждающих отверстий, что может обеспечить повышение тяги двигателя на 0,5–5% и ресурса теплонагруженных деталей ГТД на 10–50%. Использование мультieleктродов при электроэрозионной обработке перфорационных отверстий на пере и полках сопловых и рабочих лопаток даст возможность снизить трудоемкость до 50%.

Исчезает необходимость проектировать и изготавливать приспособления под каждый ряд отверстий, так как станок сам в соответствии с программой ориентирует лопатку, сам выбирает электрод требуемого диаметра, сам выполняет смену электродов и выполняет процесс перфорации. Весь процесс обработки осуществляется

одним приспособлением. Усовершенствованная техника сокращает цикл изготовления лопатки за счет того, что ее устанавливают один раз и снимают со станка один раз после прошивки всех отверстий. Деталь быстро измеряется на станке, прямо в рабочей позиции. Определяются отклонения заготовки в пространстве от номинального положения и ориентации.

Отпадает необходимость в сложной оснастке для базирования и крепления детали, не надо полагаться на оператора, чтобы обеспечить «хороший» зажим детали в приспособление.

Для обработки керамических материалов (литейные стержни и поверхности лопаток, покрытые ТЗП) используется лазерная головка, удаляющая материал с обрабатываемой детали по методу абляции (испарения).

## ВЫВОДЫ

В комбинации метод лазерной и электроэрозионной обработки позволит выполнять электроэрозионную обработку отверстий на деталях, имеющих керамическое покрытие, которое будет местно испаряться с помощью лазера.

После местного удаления покрытия может использоваться обработка отверстия методом *HS-EDM* (высокоскоростная эрозионная обработка).

Полученная конструкция охлаждающих отверстий позволяет повысить эффективность охлаждения лопаток.

В покрытии может быть сформирован трехмерный диффузор.

Методом электроэрозионного фрезерования могут быть получены уплотнительные канавки на радиальном клине.

Последовательная лазерная и электроэрозионная обработка производится за одну установку детали.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья подготовлена в рамках освоения курса повышения квалификации преподавателей: «Профессионально-ориентированный английский язык для научно-педагогических работников национального исследовательского университета по направлениям «Машиностроение» и «Технологии материалов».

Авторы выражают благодарность ПНИПУ за прохождение повышения квалификации по дополнительному профессиональному образованию.

### ЛИТЕРАТУРА

- Макаров В.Ф., Владыкин А.В. *Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов.* Брянская государственная инженерно-технологическая академия. Брянск: БГИТА, 2010, (12). С. 78–83.
- Макаров В.Ф., Абзаев Р.С., Владыкин А.В. *Инженерный журнал.* 2013, (7), 8–13.
- Елисеев Ю.С., Трошин А.Н. *Авиационная промышленность.* 2001, (1), 15–19.
- Владыкин А.В., Макаров В.Ф. *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева.* 2010, (2), 29–37.
- Владыкин А.В., Макаров В.Ф. *Технология машиностроения.* 2011, (5), 13–17.
- Бойко А.Ф. *Ремонт, восстановление, модернизация.* 2011, (4), 49–51.
- Абдукаримов Э.Т., Саидинов С.Е., Рахматуллаев М.Р., Рустамов Р.М. *ЭОМ.* 1995, (4), 6–8.
- Алтынбаев А.К., Митрофанов А.А. *Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Сборник трудов Всеросс. Научн.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2001. С. 157–159.*
- Kruth J.P., Van Hambeeck J., Stevens L. *Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XI).* Switzerland, 1995. P. 849–862.
- Postanogov V.H., Komin V.F. *Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-X).* Germany, 1992. P. 486–492.
- Саушкин Б.П. *Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей.* М.: Дрофа, 2002. 656 с.
- Фотеев Н.К., Спришевская И.А. *ЭОМ.* 1991, (2), 9–11.
- Фотеев Н.К. *Технология электроэрозионной обработки.* М.: Машиностроение, 1980. 184 с.
- Фотеев Н.К. *ЭОМ.* 1979, (6), 5–8.
- Фролов В.Я. *Материалы МНТК «Электрофизические и электрохимические технологии».* СПб.: СПбГТУ, 1997. С. 44–45.
- Смоленцев В.П. *Электрофизические и электрохимические методы обработки: В 2-х т. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1, 247 с.*
- Мицкевич М.К., Бушин А.И., Бакуто И.А. и др. *Электроэрозионная обработка материалов.* Минск: Наука и техника, 1988. 216 с.
- Саушкин Б.П. *Физико-химические методы обработки в машиностроении.* Кишинев: КПИ им. С. Лазо, 1990. 80 с.
- Смоленцев В.П., Переладов Н.П. *ЭОМ.* 1993, (6), 13–15.
- Кудрявцева, А.Л. *Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация.* 2009, (4), 32–33.
- Цегельник Е.В. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии.* 2015, **70**, 121–129.
- Блинков, В.В. *ЛазерИнформ.* 2009, (23), 5–9.
- Братухин А.Г., Язов Г.К., Карасев Б.Е. и др. *Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей.* М.: Машиностроение, 1997. 416 с.
- Ставицкий Б. И. *ЭОМ.* 2000, (5), 8–10.
- Ставицкий Б.И. *ЭОМ.* 1994, (1), 7–11.
- Полянин В.И., Алтынбаев А.К. *ЭОМ.* 1993, (6), 18–21.
- Погонин А.А., Погонин А.А., Бойко А.Ф., Домашенко Б.В., и др. *Ремонт, восстановление, модернизация.* 2010, (1), 5–7.

### Summary

The research materials of a new process of combined electroerosive-laser processing of small-diameter holes in the details of ceramic-coated gas turbine engines are presented. A mechanism is revealed that ensures high productivity and quality of processing small-diameter holes in the details of gas turbine engines made of heat-resistant alloys based on the application of combined high-speed laser-electroerosive processing using a hollow rotating electrode-tool and internal pumping of the working medium.

**Keywords:** electroerosive processing, laser processing, small diameter holes, hollow rotating electrode, pumping pressure, electrode rotation speed