

### Литература

1. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе – М.:Аспект Пресс, 1997. – 718 с.
2. Конкин А.А., Варшавский В.Я. Свойства и области применения композиционных материалов на основе углеродных волокон – Химические волокна, 1982, № 1, с. 4-9.
3. Применение углепластиков в насосостроении / Березовский В.В., Молчанов Б.И., Поляков Т.Н. – Химическое и нефтяное машиностроения, 1981, № 3, с. 14-16.
4. Углеродные волокна. Под ред. С. Симамуры. М.: Мир, 1987, 304 с.
5. Кацука К., Цутияма Н, Сато Т. Получение и переработка материалов, армированных углеродными волокнами. В сб. Углеродные волокна. – М.: Мир, 1987, с. 51-131.

### **Определение оптимального метода получения глубоких отверстий малого диаметра в деталях ГТД и его экспериментальное исследование**

Кратюк Н.А.

МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского  
8 (915) 373-91-15, na.kratyuk@mail.ru

*Аннотация.* В статье представлены результаты сравнительного анализа ряда альтернативных методов обработки отверстий, произведенного на основании оценки группой экспертов. Были проведены экспериментальные исследования процесса обработки, признанного оптимальным по итогам сравнительного анализа, а именно: влияние режимов обработки и выбора инструмента на технологические характеристики отверстий. Результаты данного исследования позволяют обоснованно подходить к выбору оптимальных параметров при обработке отверстий.

*Ключевые слова:* сравнительный анализ, прошивка отверстий, глубокие отверстия малого диаметра, электроэрозионная обработка

### Введение

Технологическая проработка деталей современных ГТД (таких как лопатки газовых турбин, сопловые аппараты, камеры сгорания, форсунки и фильтры, детали гидро- и пневмоагрегатов и т.д., изготовленных из сталей или труднообрабатываемых сплавов) показывает, что в них имеются охлаждающие и функциональные отверстия, выполняемые с высокой точностью и качеством. Диапазон диаметров этих отверстий составляет 0,2...3,0 мм при глубине до 50 мм, что часто сложно, а иногда и невозможно получить методами традиционной лезвийной обработки. Технологические проблемы изготовления подобных отверстий связаны с необходимостью достижения высокой геометрической точности обработки, большой глубиной отверстий (в ряде случаев  $L/D \geq 100$ ), расположением отверстий под острым углом (менее  $20^\circ$ ) к торцовой поверхности. Решение многих из этих задач традиционными (лезвийными) способами, применявшимися в металлообработке, стало затруднительно, неэффективно, а во многих случаях невозможно [1, 2]. Например, использование сверления приводит к образованию заусенцев на входе и выходе сверла, что требует последующих операций обработки или вообще неприемлемо (например, при невозможности удаления заусенцев). Часто возникают поломки сверл из-за их малого диаметра, увод оси из-за малой жесткости инструмента при относительно больших силах резания и т.д. Кроме того, имеются проблемы с подачей СОЖ [9].

Таким образом, применение новых технологических процессов и высокоэффективного оборудования является важным направлением развития авиационного двигателестроения. Среди таких процессов наиболее перспективными в настоящее время являются физико-

химические методы обработки [2]. Однако из всего многообразия методов обработки, существующих в настоящее время, невозможно выделить один метод, который являлся бы универсальным при обработке любых отверстий – в каждом конкретном случае необходим индивидуальный подход к выбору метода обработки. Целью данной работы является выбор оптимального метода и режимов обработки для получения описанных выше отверстий в деталях ГТД из металлических материалов (в частности сталей и титановых сплавов).

### **Постановка задачи**

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- подбор альтернативных методов обработки отверстий на основании теоретических данных, рекомендаций и исследований;
- проведение сравнительного анализа выбранных альтернативных методов и выявление оптимального;
- проведение экспериментальных исследований технологии метода обработки отверстий, признанного оптимальным по итогам сравнительного анализа;
- на основе экспериментальных данных вывести зависимости, позволяющие обоснованно подходить к определению режимов обработки и выбору режущего инструмента.

### **Сравнительный анализ методов обработки отверстий**

Для проведения сравнительного анализа в данной работе был применен принцип экспертной оценки группой экспертов без личного взаимодействия [5, 6]. Сущность данного метода заключается в проведении экспертами независимо друг от друга интуитивно-логического анализа проблемы. В состав экспертной группы вошли семь ведущих технических специалистов авиационно-космических государственных производственных предприятий, а также представители сферы образования и научно-исследовательских направлений в авиационной и космической отрасли.

Предварительно на основе теоретических и экспериментальных данных [1, 2, 3, 4] был выявлен ряд альтернативных (сравниваемых) методов обработки. Основным критерием выбора методов являлась возможность обработки отверстий диаметром 0,1...3 мм и глубиной 10...100d в заготовках из сталей и титановых сплавов. Методами, удовлетворяющими заданным условиям, являются:

- 1) гидроабразивная обработка;
- 2) лазерная обработка;
- 3) лезвийная обработка;
- 4) ультразвуковая обработка;
- 5) электрохимическая обработка;
- 6) электроэрозионная обработка.

Для оценки альтернативных методов обработки экспертам были предложены 14 критериев, разбитых на три основные группы:

#### **1. Эксплуатационные критерии:**

- точность обработки;
- шероховатость поверхности;
- геометрическая точность профиля получаемых отверстий;
- качество поверхности после обработки (наличие и величина измененного слоя, поверхностные дефекты и др.).

#### **2. Технологические критерии:**

- производительность обработки;
- время непрерывной работы;
- сложность ТПП (разработка ТП, выбор режимов, проектирование оснастки и др.);
- трудоемкость процесса (наладка оборудования и др.);

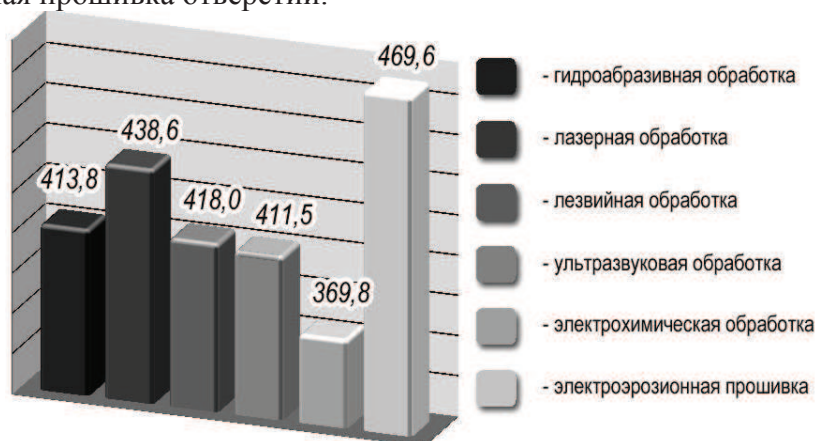
- квалификация рабочих.

3. Прочие критерии:

- стоимость оборудования;
- стоимость инструмента и расходных материалов;
- себестоимость процесса обработки;
- экологичность процесса обработки;
- энергозатраты.

Подобранные альтернативные методы обработки оценивались каждым из шести экспертов по предложенным выше критериям по 100-бальной шкале, основываясь на своих знаниях, опыте и интуиции. На основании полученных оценок, а также с учетом значимости мнения и квалификации экспертов были рассчитаны усредненные оценки, данные каждому методу всеми экспертами. При расчете усредненных оценок были учтены значимость мнений и квалификация каждого эксперта из группы, а также значимость предложенных критериев оценки.

Результатом проведения экспертизы является выбор наиболее целесообразного, по мнению экспертов, метода обработки глубоких отверстий малого диаметра. Сравнительный анализ методов обработки по каждому из 14 критериев (рисунок 1) показал, что с точки зрения поставленной цели оценки наиболее привлекательным методом обработки является электроэрозионная прошивка отверстий.



**Рисунок 1. Усредненные оценки по методам обработки**

Из справочных материалов [7] известно, что традиционный (со стержневыми электродами-инструментами) метод электроэрозионной прошивки обеспечивает возможность получения глубоких отверстий (до 50d) сложной конфигурации с требуемыми параметрами качества поверхностного слоя со значительно меньшими затратами, чем при лезвийной обработке. Кроме того, применение технологии «струйной» прошивки (с применением технологии «супердрель») позволяет значительно увеличить скорость прошивки отверстий по сравнению с методом традиционной обработки (при обработке жаропрочных сплавов время прошивки может быть снижено в 25 раз), а также увеличить глубину прошиваемых отверстий до 100...150d [8].

Для того чтобы обоснованно подходить к выбору технологических режимов и материала электрода-инструмента, был проведен ряд экспериментальных исследований (см. п. 4).

**Экспериментальное исследование**

В ходе проведения эксперимента отверстия обрабатывались на установке ELFA 731 в диапазоне следующих технологических режимов: ток короткого замыкания  $I_k = 6,4...16$  А, длительность импульса  $T_i = 3...20$  мкс, скважность  $q = 5$  и  $10$ , емкость  $C = 1...20$  мкФ. Выходные (контролируемые) параметры: глубина, диаметр (для сквозных отверстий на входе и на выходе) и форма прошитого отверстия, а также величина износа электрода-инструмента.

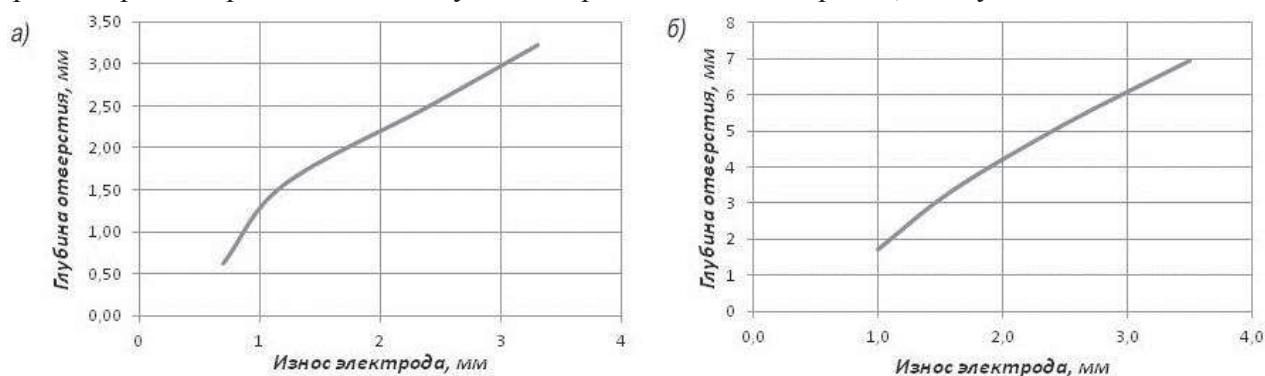
При исследовании прошивки глухих отверстий и прослеживании динамики изменения формы отверстия и износа электрода инструмента в функции времени и технологических режимов использовались составные образцы, в которых отверстия обрабатывались на их стыке. Такой подход исключает необходимость разрезания образцов в месте прошивки и уменьшает трудоемкость получения экспериментальных данных.

На основании полученных данных были выведены следующие зависимости: изменение формы получаемого отверстия в зависимости от времени обработки и материала электрода-инструмента; изменение конусности получаемого отверстия в зависимости от материала и траектории движения электрода-инструмента; влияние режимов резания на производительность обработки.

### Изучение износа электрода-инструмента

Эксперимент был проведен электродами-инструментами Ø2 мм из трех различных материалов: меди, латуни и вольфрама. Для каждого электрода проведена серия экспериментов по обработке отверстий в образце из стали 30ХГСА за определенные интервалы времени (4, 8, 12 и 16 мин).

На основе полученных данных для медного и латунного электродов были выведены графические зависимости (рисунок 2). Из этих зависимостей видно, что износ медного электрода в среднем равен 97 % от глубины обработанного отверстия, а латунного - 51 %.



**Рисунок 2. Зависимость износа электрода-инструмента в зависимости от глубины обработанного отверстия: а) медный электрод; б) латунный электрод**

Для вольфрамового электрода при заданных условиях эксперимента износа по длине не наблюдалось.

Изучение изменения формы получаемых отверстий в зависимости от времени обработки и материала электрода-инструмента

Отверстия обрабатывались в составных образцах из стали 30ХГСА, после чего измерялись и анализировались их фотографические изображения. Полученные в результате анализа данные представлены в таблице 1. Форма полученных отверстий оценивалась по следующим количественным параметрам:  $R$  – радиус у дна отверстия,  $\alpha$  – угол наклона стенок к дну отверстия и  $L$  – высота искаженного участка профиля отверстия (указана в процентах от общей глубины обработанного отверстия). В данном случае считаем, что конусность у полученных отверстий отсутствует.

В ходе эксперимента было отмечено, что форма отверстий напрямую зависит от характера износа электрода-инструмента. Отверстия, полученные медным электродом-инструментом, обладают наибольшей высотой участка отверстия с искаженным профилем - 50...100 % от общей глубины отверстия. Отверстия, обработанные латунным и вольфрамовым электродами, имеют приблизительно равные значения искажения профиля по глубине отверстия – от 20 до 40 %. Радиус у дна отверстия зависит от времени обработки и износа электрода-инструмента. Наибольшие значения данного параметра наблюдаются при прошивке отверстий латунным электродом, а наименьшие – при прошивке электродом из воль-

фрама (в некоторых случаях радиус был незначителен, поэтому его значение заменено на угол наклона стенок к дну отверстия).

Таблица 1.

### Анализ формы полученных отверстий

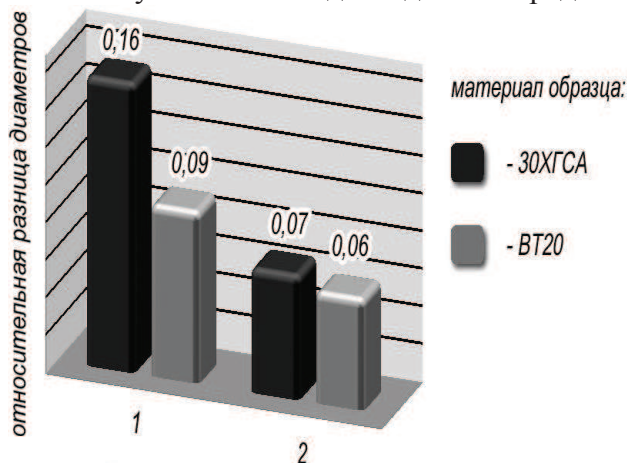
Материал электрода	Интервал времени, мин			
	4	8	12	16
Медь	L=100%; R=0,64	L=54%; R=1,15	L=42%; R=1,1	L=48%; R=1,6
Латунь	L=37%; R=0,64	L=25%; R=1,2	L=22%; R=2,1	L=38%; R=2,29
Вольфрам	L=33%; R=0,54	L=33%; $\alpha=24^\circ$	L=34%; $\alpha=26^\circ$	L=40%; R=0,66

Изучение изменения конусности отверстия в зависимости от материала и траектории движения электрода.

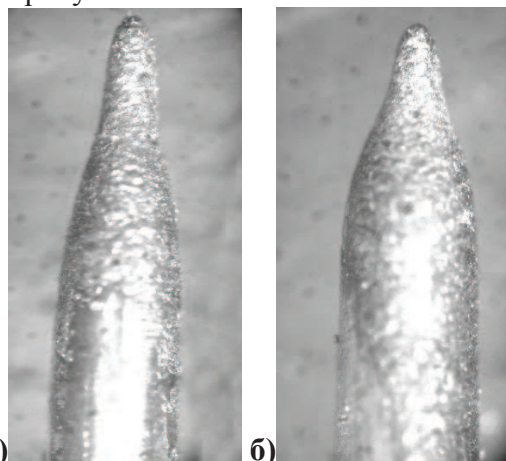
Конусность отверстий определялась для двух основных стратегий прошивки – с прямой подачей и орбитальной подачей (с получением «пенька» на дне отверстия и без него).

Для измерения конусности при прошивке с прямой подачей обрабатывались сквозные отверстия в образцах толщиной 10 мм из стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ20 стержневыми электродами  $\varnothing$  1,5 мм из меди и вольфрама, с непрерывной подачей в зону обработки рабочей жидкости (вода) методом полива.

Полученные выходные данные представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3. Отношение входного и выходного диаметров к глубине сквозных отверстий, полученных в образцах из стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ20 электродами из меди (1) и вольфрама (2)**

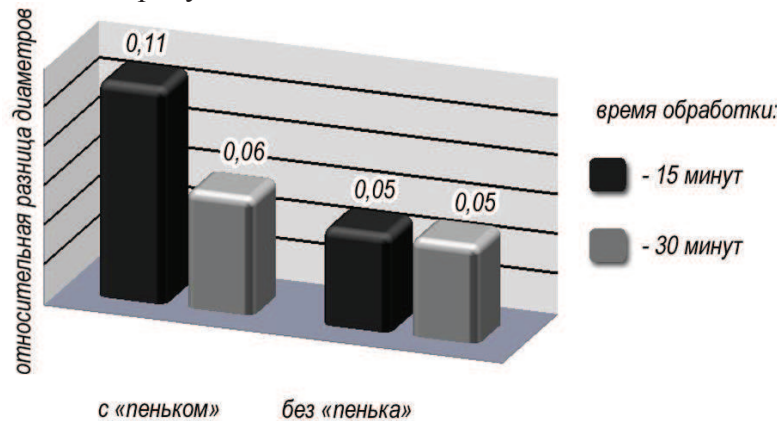


**Рисунок 4. Характер износа электрода-инструмента при прошивке сквозного отверстия: а) медного; б) вольфрамового**

Для обоих образцов видно, что наименьшей конусности удалось достичь при обработке вольфрамовым электродом. Также было определено, что при прошивке титанового сплава время обработки значительно возрастает, что обусловлено окислением материала образца. На производительность обработки также повлиял характер износа электрода-инструмента – обработка отверстия производится заостренным концом электрода, затем диаметр отверстия увеличивается и калибруется его конической частью (см. рисунок 4).

Эксперимент по определению конусности при орбитальном движении электрода-инструмента проводился стержневым электродом  $\varnothing$  0,5 мм из вольфрама в образце из стали 30ХГСА с непрерывной подачей в зону обработки рабочей жидкости (вода) методом полива. В данном случае обрабатывались глухие отверстия за равные интервалы времени (15 и 30 минут) с «пеньком» и без «пенька» в центре отверстия. Полученные выходные данные экс-

перимента представлены на рисунке 5.



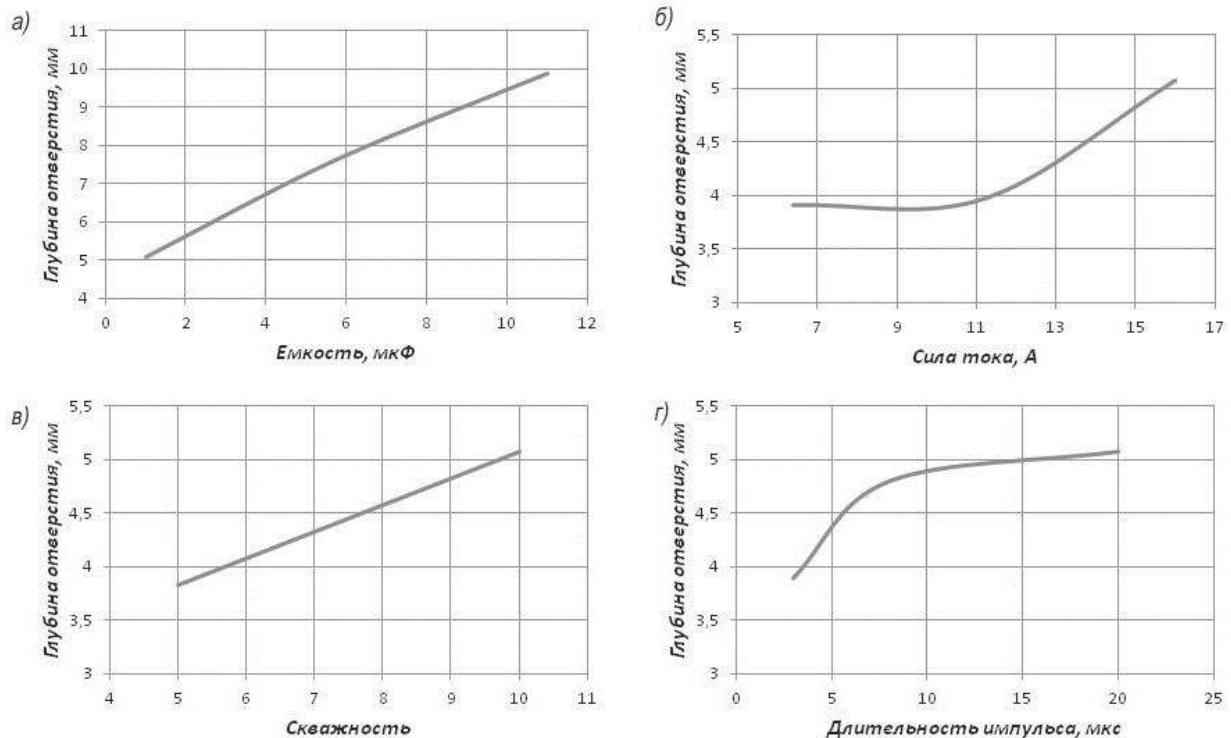
**Рисунок 5. Отношение разницы диаметров на входе и у дна отверстия к глубине в зависимости от времени обработки и наличия «пенька» в центре отверстия**

Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что обработка без образования «пенька» предпочтительнее с точки зрения конусности отверстия, чем с образованием «пенька».

#### Изучение влияния режимов резания на производительность обработки.

Эксперимент проводился на образце из титанового сплава BT20 путем варьирования различных параметров (емкости, силы тока, скважности, длительности импульса) при прочих равных условиях: сила тока  $I = 16\text{A}$ ; емкость  $C = 1\text{мкФ}$ ; скважность  $q = 10$ ; длительность импульса  $T_i = 20\text{ мкс}$ ; частота вращения электрода  $n = 1500\text{ об/мин}$ .

При этом время обработки каждого отверстия составило 20 минут, а рабочая жидкость (вода) подавалась в зону обработки методом полива. Результаты данной серии экспериментов представлены на рисунке 6.



**Рисунок 6. Зависимость глубины прошиваемого отверстия от изменения: а) емкости, б) силы тока, в) скважности и г) длительности импульса при прочих неизменных параметрах**

### Выводы

Исходя из результатов сравнительного анализа методов обработки отверстий (рис. 1) наиболее привлекательным методом обработки является электроэрозионная прошивка.

Для того чтобы иметь возможность обоснованно подходить к выбору режимов электроэрозионной прошивки и материала электрода-инструмента, был проведен ряд экспериментов, в ходе которых получены некоторые зависимости. На основании этих данных можно сделать следующие общие выводы:

- для получения глухих отверстий с наиболее правильной геометрией предпочтительнее использовать вольфрамовые электроды;
- наибольшей производительности прошивки можно достичь, используя латунные электроды, однако при этом износ инструмента по длине приблизительно равен глубине прошитого отверстия;
- наименьшим износом при средних показателях производительности обладают электроды из вольфрама;
- при орбитальном движении электрода-инструмента можно достичь меньших значений конусности в отверстиях (при этом более предпочтительна схема без образования «пенька»);
- при увеличении значений емкости и скважности происходит равномерный рост производительности, а при увеличении силы тока и длительности импульса производительность увеличивается скачкообразно.

### Литература

1. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей / Бойцов А.Г., Ковалев А.П., Новиков А.С. и др. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 584 с.
2. Ставицкий И.Б. Электрофизические и электрохимические методы обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
3. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, С.К. Плужников и др. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1988. 269 с.
4. Наукоемкие технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии: учебное пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: ФОРУМ, 2013 – 928 с.
5. Курицына В.В., Косов Д.Е., Курицын Д.Н. Автоматизированная система обработки экспертных оценок при принятии технологических решений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012, т. 8, № 4, с. 44-55.
6. Курицына В.В., Косов Д.Е., Курицын Д.Н. Автоматизация задач экспертного оценивания в процедурах технологического менеджмента авиационного производства // Научные труды (Вестник МАТИ), 2012, № 19 (91), с. 162-173.
7. Биленко С.В., Сариллов М.Ю., Бурдасов Е.Н., Маслацова А.Э. Исследование процесса электроэрозионного прошивания отверстий // Фундаментальные исследования, 2012, № 9 (часть 4), с. 882-888.
8. Макаров В.Ф., Владыкин А.В. Исследование процесса электроэрозионного сверления отверстий малого диаметра в деталях газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов // Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении». Выпуск 12. Брянск: БГИТА, 2009, 134 с.
9. Коровин А.А., Смоленцев Е.В. Оптимизация гидравлических параметров прошивки глубоких отверстий электроэрозионным методом // Перспективные разработки науки и техники-2011: материалы VII международной научно-практической конференции – Пржемысл: “Nauka I studia”, 2011, Вып. 56, с. 61-63.