

На правах рукописи

**ХАФИЗОВ Ильдар Ильсурович**

**МАЛООТХОДНОЕ ЧИСТОВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ  
ДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ**

Специальность 05.03.01 – Технологии и оборудование  
механической и физико-технической  
обработки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2007

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Садыков Зуфар Барыевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Станчев Дмитрий Иванович;  кандидат технических наук Склокин Владимир Юрьевич
Ведущая организация	Липецкий государственный технический университет

Защита состоится 16 мая 2007 г. в 14<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.037.04 Воронежского государственного технического университета по адресу: 394026, Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета.

Автореферат разослан \_\_\_ апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Кириллов О.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Заготовительные операции по разделению всех видов материалов включают ручное и машинное разрезание на оборудовании различного назначения. Для этого используются как традиционные способы (прессы, металлорежущее оборудование с металлическим и абразивным инструментом и др.), так и новые виды обработки (лазерная резка, электроэрозионное разделение, ультразвуковые процессы). В машиностроении имеется достоверная информация об освоенных методах, их предельных возможностях и недостатках. С увеличением доли затрат на материалы возникла проблема изыскания новых видов разделения материалов, особенно это коснулось дефицитных и дорогих сплавов типа драгоценных металлов, вольфрама, магнитных сплавов, хрупких материалов, где выход годных деталей после обработки становился менее половины исходной массы, а дефекты, вносимые в поверхностный слой при разрезке, сохранялись в изделии и снижали его характеристики.

Автор выбрал в качестве объекта исследований две группы токопроводящих материалов: вязкие (бериллиевая бронза и др.), хрупкие (вольфрам, магнитные сплавы и др. сплавы), которые имеют высокую стоимость и весьма дефицитны. В мировой практике разделение таких материалов в основном выполняют вулканитовыми кругами, электроэрозией, ультразвуковым методом, лазером. Однако такие методы не позволяют обеспечить требуемые достаточно высокие требования по точности, качеству поверхностного слоя, производительности, снижению потерь материала. Кроме того, большинство применяемых методов вызывает загрязнение окружающей среды (пыль при использовании абразива и др.).

Совмещение различных воздействий на объект обработки позволяет спроектировать комбинированные методы, в частности электроабразивный (электроалмазный). Эти методы применяются для резки при получении заготовок с последующей обработкой, которая в ряде случаев (изготовление деталей приборов, радиотехники, средств управления) нежелательна, т.к. приводит к неоправданным потерям материала, вторичным погрешностям и дефектам, резко повышает стоимость изделий. Установление однозначных связей между свойствами обрабатываемых материалов сочетанием воздействий комбинированного процесса позволяет создать современное автоматизированное оборудование с управлением механической, химической, эрозионной составляющей в едином процессе, обеспечивающем получение после разделения материалов готовых деталей с погрешностью не выше 30 мкм и с шеро-

ховатостью не выше 0,32 мкм. При этом устраняются негативные воздействия на окружающую среду и до 2 раз ускоряется цикл изготовления деталей.

Использование подобных процессов ускоряет создание новых конкурентоспособных изделий, расширяет технологические возможности производства, способствует снижению дефицита и затрат на материалы. Это актуально для современного машиностроения и отвечает мировым требованиям к новой продукции.

Работа выполнялась по программам и заданиям отраслевых Министерств и в рамках одного из научных направлений АТН РФ «Развитие новых высоких технологий».

**Целью работы** является разработка комбинированного технологического процесса, автоматизированного оборудования, средств управления, новых конструкций инструмента для малоотходного разделения материалов с получением готовых изделий.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка требований к технологической системе для обеспечения возможности получения без последующей обработки деталей с требуемыми характеристиками.

2. Создание путей стабилизации параметров процесса разделения для изделий из различных материалов.

3. Обоснование пределов снижения потерь материалов на их разделение.

4. Разработка технологических режимов, конструкции инструмента для малоотходного разделения дефицитных материалов.

5. Создание многокоординатного автоматизированного модуля для малоотходного разделения материалов.

**Методы исследований.** При выполнении работы использовались научные основы механики, теплотехники, теории резания абразивным инструментом, методы оптимизации, теория электрических и комбинированных методов обработки, автоматизации производственных процессов.

#### **Научная новизна**

1. Установлены взаимосвязи и закономерности взаимного влияния механического воздействия и электрического поля на параметры режимов комбинированной обработки различных видов материалов.

2. Раскрыт механизм получения требуемых показателей по точности и качеству поверхностного слоя за счет автоматического поддер-

жания режимов процесса на всех этапах разделения материалов при минимальной ширине инструмента.

3. Приведены численные методы расчета конечных результатов разделения по точности, показателям качества, экономии, что позволило обосновать предельные возможности разработанной технологии и расширить возможности разработчиков по созданию востребованной продукции.

4. Научно обоснованы пути поддержания формы и положения нежесткого инструмента в процессе интенсивного разделения хрупких и вязких материалов.

### **Практическая значимость**

1. Разработан технологический процесс комбинированного разделения материалов с адаптацией режимов в зависимости от требований к изделию, что позволило при минимальных потерях материалов получить детали без последующей обработки.

2. Создан новый инструмент для комбинированной обработки (поданы заявки на патенты).

3. Создан автоматизированный модуль с элементами адаптации, позволяющий практически исключить потери материала от брака при разделении, достичь высоких технологических показателей процесса.

### **Личный вклад автора**

1. Создание механизма и моделей комбинированного разделения материалов с различными свойствами и установление теоретически достижимых границ получения технологических показателей по точности, качеству поверхностного слоя.

2. Разработка методики проектирования комбинированных инструментов с управляемой жесткостью при минимизации его толщины.

3. Создание и совершенствование средств автоматизации при разработке оборудования с адаптацией технологических режимов.

4. Технологическая подготовка к освоению серийного выпуска изделий из дефицитных материалов с минимальными потерями и сроками освоения для обеспечения конкурентоспособности изделий.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Работа внедрена на Казанском заводе «Электроприбор» при разделении цилиндрических стержней из вольфрама и магнитных сплавов типа АЛНИКО на таблетки, на ГНПП «ТЭХО» при разделении полупроводниковых материалов, на КАПО при прорезке каналов гидротопливной аппаратуры, на предприятиях Воронежа. В результате внедрения расход материалов на разделение снижен до 10 раз, цикл изготовления в 1,5 – 2,0 раза, затраты на операцию до 3 раз.

Проведены исследования процесса для других дефицитных материалов, используемых в промышленности, медицинской технике, рекомендации переданы заинтересованным организациям.

Эффект от внедрения превышает 29 тысяч рублей на станок. При потребности в таком оборудовании 18 наименований ожидаемый эффект превышает 560 тысяч рублей.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на Международных научно-технических конференциях «Научная работа в университетских комплексах» (Воронеж, 2005), «ССП-2005» (Воронеж, 2005), на отраслевой научно-технической конференции «Развитие производства авиационных поршневых двигателей» (Воронеж, 2005), Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии» (Липецк, 2006), II Республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Казань, 2005), Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения» (Казань, 2005) XVIII Всероссийской научно-технической конференции (Казань, 2006), Международной научно-практической конференции (Пенза, 2006), на ежегодных научных конференциях КГТУ-КАИ (Казань, 2003-2007).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Личный вклад соискателя в работе [1] – модель процесса разделения материалов, изучены вопросы управления процессом комбинированной (электроалмазной) обработки высокотвердых материалов; [2] – установлены особенности и основные факторы, влияющие на эффективность процесса обработки; [3] – установлена связь между режимами анодного растворения и образованием продуктов обработки.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, списка литературы из 100 наименований, приложений на 3 листах, материал изложен на 183 страницах, содержит 60 рисунков, 12 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, раскрыты научная новизна и значимость исследований.

**В первой главе** рассмотрены технологические приемы с наложением электрического поля для малоотходного разделения материалов.

В качестве базы для сравнения выбрана разрезка вулканитом, позволяющая разделять хрупкие и дефицитные материалы. Однако ши-

рина паза (а следовательно, и потери материалов) превышает 1-2 мм, что для изделий из вольфрама и магнитных сплавов может превышать 50%.

Электроабразивная резка токопроводящих материалов позволяет снизить расход материала и может успешно использоваться при разделении мелких заготовок, обеспечивая получение деталей с погрешностью не более 0,05 мм. Однако с увеличением диаметра (толщины) заготовок погрешность начинает возрастать за счет бокового анодного растворения пазов. Возникает клиновидность (конус) паза, размеры которого могут изменяться на величину, соизмеримую с толщиной дискового инструмента. Требуется последующая обработка, что увеличивает потери материала и качество изделий.

Анализ известных процессов и оборудования показывает, что можно достичь высокой точности деталей при разделении за счет установления закономерностей процесса при переменных условиях обработки, созданием автоматизированных систем управления процессом с адаптацией параметров, в частности подачи инструмента – диска, управления его состоянием при резке, контролем и корректировкой положения режущей части в пазе.

Вторым эффективным направлением исследований по снижению потерь дефицитных материалов является использование оснастки с удержанием деталей до окончания калибровки боковых поверхностей паза.

Из состояния вопроса вытекают задачи исследований, позволяющие достичь заявленной цели.

**Во второй главе** рассмотрены пути снижения расхода материалов при их разделении комбинированными методами.

Показано, что критериями оценки разрабатываемых технологических процессов являются показатели качества получаемых изделий, главным образом по точности и характеристикам поверхностного слоя. Для описания процессов в зоне разделения автор использовал системный подход, включающий обобщенную оценку совместных воздействий режимов, управляющих систем оборудования, геометрии и положения рабочей части инструмента при разделении материалов с различными свойствами.

На базе ранее выполненных исследований соискатель выдвинул и обосновал рабочие гипотезы:

1. Применение анодной составляющей в комбинированном процессе значительно снижает силы резания от механического воздействия

при разделении материалов, что позволит ускорить процесс без нарушения точности и качества поверхностного слоя.

2. Управление комбинированным процессом разделения материала возможно за счет изменения анодной составляющей в широких пределах, что даст снижение сил резания и исключит дефекты (сколы, заусенцы) на выходе из зоны резания инструмента для любых материалов.

3. Управление комбинированным процессом возможно независимым изменением параметров химической и механической составляющей с ограничениями их предельных значений. Целью управления может стать оптимизация технологических режимов, объединяющая все составляющие комбинированного процесса.

4. Управление процессом возможно при использовании адаптивных систем, работающих по известному механизму взаимодействия элементов технологической системы с ограничениями по предельной погрешности поверхности разделения материала и допустимой микрошероховатости.

5. Адаптивные системы оборудования позволяют осуществлять обратные связи и выполнять оперативную корректировку режимов по выбранным воздействиям в зависимости от свойств разделяемого материала и требований к изделию.

6. Управление точностью разделения возможно через поддержание требуемого положения режущей кромки нежесткого инструмента внешними воздействиями, управляемыми автоматически.

На базе гипотез разработана экспериментальная установка, имеющая координату с адаптивным управлением, что позволило ускорить создание автоматизированного модуля с требуемым количеством координат, в том числе с адаптивным управлением.

Предложенный системный подход включает научно обоснованную оценку достижимых показателей при разделении заготовок с сечением до 15 мм (наиболее часто используемые изделия из дефицитных материалов), позволяет обосновать возможные пути решения задачи окончательной обработки при разделении заготовок из материалов с особыми свойствами (хрупкие магнитные изделия, вольфрам и др. сплавы).

Решение проблемы стабилизации параметров разделения возможно при адаптивном управлении процессом, режимами, положением режущей части, инструмента в пазах, что дает возможность достичь предельных показателей по точности при разделении заготовок. Показано что расширение технологических возможностей процесса становится



реальным после калибровки боковых поверхностей паза по патенту соискателя (подана заявка на изобретение).

В процессе исследований намечено установить связи между механическим воздействием абразива, анодным растворением по боковым поверхностям пазов, определяющие показатели процесса по точности и качеству поверхностного слоя.

Обоснованный выбор средств автоматизации для автоматизированного модуля дает возможность разработать новые способы и устройства, создающие приоритет на рынках сбыта при выпуске конкурентоспособной продукции.

**В третьей главе** рассмотрено моделирование процесса чистового разделения материалов с минимальными потерями. Для этого проанализированы известные и вновь предложенные схемы чистовой обработки тонкими электроабразивными (электроалмазными) стандартными и специальными дисками. Наиболее пригодной оказалась схема резки с кассетной загрузкой заготовок при использовании многодискового инструмента. Реализация такой схемы возможна, если оборудование снабжено адаптивными системами управления по нескольким координатам. Применение схемы и новых способов, предложенных соискателем, позволяет снизить расход дефицитных материалов при разделении за счет снижения ширины паза до 0,3-0,4 мм, исключить последующие операции обработки мест разделения. А предлагаемая схема кассетного многоинструментального разделения обеспечивает требуемую для серийного производства производительность и резко сокращает затраты на операцию и материал.

Для выбранной схемы обработки научно обоснованы границы достижения заданных (или достижимых) показателей процесса разделения материалов.

В результате моделирования параметров схемы установлены закономерности для адаптивной подачи инструмента (или заготовки) на врезание с управлением по силе подачи или скорости.

Используя в качестве управляющей функции критерий постоянства давления

$$P_{уд} \rightarrow \text{const}, \quad (1)$$

можно установить закон регулирования скорости подачи по известным свойствам разрезаемого материала (через давление Руд), геометрии заготовки и инструмента через силу подачи (Р)

$$P = 2 K_p \cdot \bar{P}_{уд} \cdot H \sqrt{l(D_3 - 1)}, \quad (2)$$

где Руд - давление электроабразивного круга при разделении заготовок (справочный материал); Кр – коэффициент, учитывающий снижение давления при наложении электрического поля (Кр = 0,8 – 0,82); Н – ширина паза в месте обработки (равна толщине электроабразивного диска - инструмента); l – глубина паза; D<sub>3</sub> – диаметр (или сечение в плоскости резания) заготовки.

Время (τ) разделения заготовки по глубине при переменной скорости подачи может быть рассчитано по зависимостям:

- при вращении заготовки

$$\tau = \frac{D_3}{4 \cdot V_{\text{нач}} \left(1 + \frac{l_0}{D_3}\right)}, \quad (3)$$

где V<sub>нач</sub> - начальная скорость врезания;

l<sub>0</sub> - глубина врезания инструмента в заготовку, где происходит адаптация системы подачи на разделение (l<sub>0</sub> = 0,2-0,5 мм).

- без вращения заготовки время τ<sub>н</sub> = 2τ.

Рассмотрены предельные значения погрешностей, вызванных воздействием электрического поля на поверхности паза. Для крупных заготовок с их вращением при разделении нижний предел погрешности (δ) за счет образующейся конусности составляет:

$$\delta = K_a \sqrt{\left(\frac{H - H_1}{2}\right)^2 + 2 \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \eta \cdot \chi \cdot (U - \Delta U) \cdot \frac{D_3}{4 \cdot V_{\text{нач}} \left(1 + \frac{l_0}{D_3}\right)}}, \quad (4)$$

где K<sub>a</sub> – коэффициент активного использования для прохождения тока боковой поверхности инструмента (K<sub>a</sub>=0,5 – 0,7);

H – толщина рабочей части диска;

H<sub>1</sub> – толщина нерабочей части диска;

α – электрохимический эквивалент материала заготовки;

γ – плотность материала заготовки;

η – выход по току;

χ – удельная электропроводность рабочей среды;

U – напряжение на электродах;

ΔU – потери напряжения.

Если заготовка не вращается, то погрешность (δ<sub>н</sub>) возрастает в 2 раза.

При допуске на полученные разделением диски 0,02 мм даже при адаптивной подаче удается получить окончательный размер детали для диаметров заготовок не более 3 мм, а с допуском 0,05 мм – до диаметра  $D_3 \leq 5-7$  мм (для различных материалов).

Предложен новый способ калибровки паза путем осевого перемещения инструмента на величину конусности (уклона стенок) паза. Это сняло ограничения по диаметру заготовки, хотя и вызвало увеличение ширины паза на 0,05-0,1 мм. Процесс калибровки осуществим при наличии в оборудовании координаты с адаптивным управлением.

Разработана модель изменения положения и формы тонкого инструмента (толщина от 0,25-0,3 мм). Показано, что в зависимости от свойств материала предельные размеры инструмента при расчетной силе Р находят:

– наибольший диаметр инструмента  $D_u$  из зависимости

$$D_u = y - \frac{B}{3a}, \quad (5)$$

$$B = \frac{4}{3} \cdot l^2 \cdot \mu^2, \quad (6)$$

где  $\mu$  - коэффициент приведенной длины (табличное значение), зависит от схемы закрепления. В нашем случае  $\mu = 0,699$ ),  $a = 4 \cdot l \cdot \mu^2$ .

В формуле (5)

$$y = U + V, \quad (7)$$

где

$$U = \sqrt[3]{\left( \frac{K_y \cdot E \cdot H_1 \cdot D_3}{48 \cdot K_P^2 \cdot P_{уд}^2 \cdot H^2 \cdot l \cdot \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)} + \sqrt{\left( \frac{K_y \cdot E \cdot H_1 \cdot D_3}{48 \cdot K_P^2 \cdot P_{уд}^2 \cdot H^2 \cdot l \cdot \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)^2 - \frac{l^6}{729}}$$

где  $K_y$  – коэффициент устойчивости (табличные значения).

В нашем случае  $K_y = 20,19$ .

$$V = \sqrt[3]{\left( \frac{K_y \cdot E \cdot H_1 \cdot D_3}{48 \cdot K_P^2 \cdot P_{уд}^2 \cdot H^2 \cdot l \cdot \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)} - \sqrt{\left( \frac{K_y \cdot E \cdot H_1 \cdot D_3}{48 \cdot K_P^2 \cdot P_{уд}^2 \cdot H^2 \cdot l \cdot \mu^2} - \frac{l^3}{729} \right)^2 - \frac{l^6}{729}}$$

$E$  - модуль продольной упругости материала инструмента (для латунного диска  $E = 1,3 \cdot 10^5$  МПа).

Минимальная толщина инструмента абразивного диска ( $H$ )

$$H=H_1+\frac{2}{3}h, \quad (8)$$

где  $h$  – размер абразивного зерна.

Расчеты показывают, что минимальная толщина инструмента с абразивом составляет 0,25 мм. Для такого диска наибольший диаметр, обеспечивающий устойчивость при расчетной силе подачи, не более 80-100 мм, что подтверждается экспериментальными результатами, где применялась толщина диска не ниже 0,3 мм (учитывается неустойчивость свойств материалов, зерна, режимов).

Рассмотрены пути стабилизации положения диска в пазе. Соискатель использовал материалы изобретений и предложил свои решения, на которые поданы заявки на патенты.

При разделении заготовок в кассете диаметр инструмента близок к предельному минимальному и случайные воздействия на процесс могут вызвать изгиб диска в пазе, что нарушает стабильность процесса, точность и качество детали. Предложено предусмотреть в модуле управляющую координату, которая по сигналу о возможности короткого замыкания между инструментом и стенками паза подает импульсный короткий разряд, вызывающий в рабочей среде активное противодействие изгибу инструмента. Локальное давление разряда ( $P_{\text{Э}}$ ) может быть установлено по (9)

$$P_{\text{Э}} = 0,12 \cdot \mu_0 \cdot k_{\text{Н}}^2 \cdot U^2 \cdot C, \quad (9)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$k_{\text{Н}}$  – коэффициент, характеризующий разрядник (устанавливается экспериментально);

$U$  – напряжение импульса (более 40 кВ);

$C$  – емкость разрядной цепи. Рассчитывается по величине упругости диска при изгибе в пределах паза.

Наличие в модуле управляющих координат позволяет стабилизировать положение режущей кромки инструмента в пазе, что значительно снижает величину погрешностей из-за вибрации диска. Для подачи стабилизирующей жидкости используется насос высокого давления, подающий рабочую среду (электролит) на боковые поверхности дискового инструмента на выходе его из паза по сигналам датчиков положения режущей кромки. Это гасит автоколебания инструмента, нарушающие стабильность разделения, точность деталей и показатели качества поверхностного слоя.

Соискатель предложил новый способ повышения точности детали путем ее калибровки после разделения. Способ осуществляется за

счет управления по координате модуля, расположенной вдоль оси диска.

**В четвертой главе** приведены результаты разработки комбинированного технологического процесса создания автоматизированного оборудования, оснастки, обеспечивающих малоотходное чистовое разделение материалов.

Сформирована методология проектирования комбинированных технологических процессов для автоматизированного оборудования с дискретным расчетом режимов обработки для каждой управляющей координаты.

Технологический процесс включает:

- исходную информацию, содержащую кроме общепринятых сведений, данные об автоматизированном оборудовании, его адаптивных системах управления;

- выбираемые параметры:

А. Окружная скорость диска ( $W_{и}$ ). Зависит от размеров дискового инструмента, сечения заготовки, ее формы, ограничений по точности, шероховатости и других факторов.

В работе рассматриваются металлосберегающие технологии разделения, поэтому толщина дискового инструмента должна лежать в диапазоне 0,3-0,5 мм. Для этого диапазона скорость  $W_{и}$  может изменяться в достаточно широких пределах  $15 < W_{и} < 30$  м/сек.

Для случая электроалмазного разделения хрупких и вязких материалов тонкими дисками базовый рабочий диапазон скоростей составляет 20-25 м/сек (при сечении заготовки 8 мм). Выбранная скорость корректируется (в зависимости от формы и размеров сечения заготовки) по кривым, приведенным в работе.

Б. Рабочая среда.

Известны рекомендации по выбору рабочих сред для большинства сплавов. Для рассматриваемых дефицитных и хрупких материалов предложены рабочие среды на базе  $\text{NaNO}_3$ , обеспечивающие стабильные технологические показатели при разделении.

Используемые электролиты имеют практически одинаковые показатели, но добавка в состав  $\text{NaNO}_3$  способствует защите от коррозии деталей оборудования и оснастки, поэтому для сложных обрабатываемых модулей рекомендуется рабочая среда  $15\% \text{NaNO}_3 + 2\% \text{NaCl}$  при температуре до 300К, что обеспечивается за счет естественного охлаждения жидкости.

В. Напряжение.

При разделении материалов без управления положением диска уже при напряжении 8В режим становится нестабильным, что вызывает новые случайные и систематические погрешности, нарушает показатели качества поверхностного слоя. Из анализа результатов наших исследований следует, что стабильный режим начинается с 5-6 В и заканчивается при 7-8В. С использованием адаптивного управления подачей инструмента, положением режущего участка в пазе диапазон напряжений может быть расширен до  $4 < U < 8В$ .

Реализация предлагаемого технологического процесса возможна, если создан новый автоматизированный модуль с адаптивными управляющими координатами. Испытания экспериментальной установки создали предпосылки проектирования модуля. В модуле предусмотрено 4 рабочих управляющих координаты и 1 резервная. Поэтому технологический процесс строится с учетом реализации режимов обработки по управляющим координатам.

**I координата** – управление скоростью подачи дискового инструмента. Как показано в главе 3, скорость регулируется по критерию

$$\text{Руд} \rightarrow \text{const.} \quad (10)$$

Тогда закон управления будет соответствовать функции:

$$P = f(P_{\text{уд}}, H, D_3, l, \text{характеристика материалов инструмента и заготовки}). \quad (11)$$

Наибольшая величина P (в диаметральном сечении) может быть найдена для различных размеров заготовок расчетным путем и автоматически скорректирована модулем по экспериментальному значению, полученному в процессе отладки режима.

Сигналом для изменения подачи диска может служить изгиб профиля инструмента, управляемый датчиками, колебание периферийной части инструмента к стенкам паза, что нарушает точность, увеличивает ширину диска, расширяет припуск на последующую операцию. При стабильных исходных данных адаптивное управление подачей инструмента в 4-х координатной системе обеспечивает работу диском с толщиной более 0,25-0,3 мм, ширину паза от 0,3 мм, погрешность (в зависимости от диаметра заготовки) от 0,015 мм, шероховатость  $R_a=0,32-1,25$  мкм.

**II координата** – управление положением режущей части диска в пазе. Обеспечивает стабильность обработки путем гашения колебательных (особенно автоколебательных) перемещений периферии диска. Предложенный в работе способ позволяет на ранней стадии колебательного процесса погасить развитие нестабильности (время реакции

0,1-0,5 сек.), что практически не нарушает точности паза за счет смещения режущей части диска в сторону стенок паза.

**III координата** – стабилизация формы диска. Позволяет исключить воздействие случайных факторов, вызывающих изгиб диска. Использование этой координаты необходимо при разделении заготовок в кассете, когда приходится увеличивать диаметр диска на глубину разделения нескольких рядов заготовок.

Управление процессом выполняется по сигналу датчика путем инициирования разряда от внешнего источника.

Режим работы третьей координаты определяется энергией разряда через емкость конденсаторов, рассчитываемой по формуле:

$$C = \frac{P_y}{0,12 \cdot \mu_0 \cdot K_n^2 \cdot U^2}, \quad (12)$$

где  $P_y$  – сила упругости материала диска. Зависит от свойств материала, схемы закрепления (в нашем случае принимается как балка с опорами на концах), места разряда (принимается, наружный контур паза), допустимого прогиба (изменение ширины паза на сторону за счет анодного растворения стенок).

Расчет показывает, что емкость конденсатора в схеме управления не превышает 1-3 мкФ.

Применение многоинструментальной обработки повышает производительность процесса, учитываемую коэффициентом  $K_M$ :

$$V_{И} = V_{И1} \cdot K_M(n), \quad (13)$$

где  $V_{И1}$  – скорость подачи инструмента при одном диске;  $K_M$  – коэффициент изменения скорости подачи в зависимости от числа дисков ( $n$ ). Выбор  $K_M$  приведен в работе.

Многоинструментальное разделение целесообразно использовать в серийном производстве с числом дисков не более 10-12. Далее обеспечить стабильность процесса не удастся даже при полной адаптации управления процессом. В рассматриваемом случае усложняется настройка оборудования, могут возникать дополнительные погрешности из-за неравномерного износа инструмента.

**IV координата** обеспечивает калибровку стенок паза по способу, предложенному соискателем. Осевое перемещение инструмента позволяет снизить погрешность до 20 и даже 10мкм, но требуется предусматривать припуск на калибровку, который зависит от суммарной погрешности при разделении.

Расширять этот припуск нежелательно, т.к. он увеличивает потребности дефицитных материалов.

Минимальная величина припуска ( $Z_{\min}$ ) зависит от суммарной погрешности при разделении заготовки ( $\delta_{\Sigma}$ ) и допуска на размер детали  $[\delta]$ .

$$Z_{\min} = \delta_{\Sigma} - [\delta] \quad (14)$$

Адаптация включает выбор минимального осевого перемещения заготовок (или инструмента) и оценку необходимости в калибровке, где критерием является  $Z_{\min} > 0$ .

В серийном производстве четвертая координата может быть не адаптивной, т.к. там может использоваться критерий  $H_0 = Z_{\min} \rightarrow \text{const}$ , где  $H_0$  - постоянное осевое перемещение заготовок вдоль оси.

Создан автоматизированный модуль для разделения материалов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработан технологический режим, созданы новые конструкции инструмента и оборудования для комбинированного разделения материалов, что позволило снизить потери материала до 10 раз, повысить точность и качество поверхностного слоя до уровня требований к готовому изделию, сократить цикл изготовления деталей до 2 раз, затраты на операцию – до 3 раз, устраняется загрязнение окружающей среды продуктами обработки.

Реализация работы позволяет получить прибыль более 560 тысяч рублей.

### **Основные выводы и результаты работы**

1. Сформулированы требования к технологической системе для комбинированного разделения материалов. Требования включают: поддержание постоянными соотношения параметров механического, теплового и химического воздействия на характеристики режимов обработки с использованием адаптивного управления процессом; управление формой и положением инструмента в течение цикла разделения по сигналам от блока автоматизации оборудования; ограничение режимов в зависимости от вида обрабатываемого материала; возможность независимого и совместного управления воздействиями в комбинированном процессе; требования по надежности к средствам автоматизации модуля, включающие срок безотказной работы не менее ресурса механической части оборудования.

2. Решена проблема стабильного получения заданной точности и качества поверхностного слоя путем автоматизированного управления составляющими режима комбинированного процесса формой и положением инструмента, применением адаптивных систем управления.



При разделении вольфрама и магнитных сплавов устранены скалывания и нарушения кромок, достигнуты результаты:

- погрешность по торцам не более 20 мкм (допуск 0,03 мм);
- шероховатость  $Ra = 0,32$  мкм (допускается 0,63 мкм);
- снижение потерь материала на разделение: для вязких сплавов до 8 раз, для хрупких материалов – до 10 раз.

3. Обоснованы предельные возможности комбинированного разделения. В частности, показано, что за счет снижения интенсивности процесса на выходе из паза, замены материалов и размеров инструмента, введения дополнительных блоков адаптивного управления автоматизированным модулем возможно снизить потери материалов (например драгоценных металлов, полупроводников) до 10 раз по сравнению с достигнутым уровнем (ширина реза диском может быть снижена до 0,3 мм).

4. Разработаны новые (на уровне изобретений) конструкции дисковых электродов с адаптивным управлением положением режущей кромки в зависимости от состояния абразивной составляющей и режима разделения материала.

5. Создан многокоординатный автоматизированный модуль с блоками адаптивного управления механическими, электрическими и силовыми факторами

Основные технические характеристики модуля:

Размеры разделяемых заготовок,

Площадь реза, мм<sup>2</sup>..... до 180

Длина заготовки, мм..... до 100

Число управляющих координат..... 5

Система управления..... адаптивная

Диапазон рабочих подач инструмента, мм/сек.... 0,03-0,2

Напряжение, В..... 3-8

Модуль выпускался малыми сериями по заказам предприятий.

6. Оптимизированы технологические режимы и разработан технологический процесс разделения материалов исследуемых марок. Технологический процесс спроектирован в форме дискретной системы с автономным управлением режимами по координатам с адаптацией параметров для конкретных условий обработки. Показано, что при адаптивном управлении процессом и положением режущей кромки инструмента появляется возможность снизить энергетическое воздействие на процесс за счет напряжения до 2 раз, устранить опасность прижогов и повысить до 2-х раз точность поверхностей раздела без ухудшения их качественных характеристик.

7. Проведены промышленные испытания технологической системы для различных изделий машиностроения, приборостроения, радиотехники. Достигнуты положительные результаты и получен экономический эффект от внедрения.

8. Раскрыты перспективы использования результатов работы в других отраслях, применяющих драгоценные и дефицитные материалы (медицинская техника, стоматология, средства управления аппаратами, электрические разъемы и др.), где экономия от устранения потерь металлов может составить значительную сумму.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Хафизов И.И., Садыков З.Б. Управление процессом комбинированной (электроалмазной) обработки высокотвердых материалов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2007. № 1. – С. 18-20.

2. Хафизов И.И., Садыков З.Б. Исследование структурной стабильности сплава ЭП 702, оптимизация термообработки сплава на максимальные упругие свойства // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2007. № 3. – С. 31-34.

Статьи и материалы конференций

3. Сабитов А.Ф., Хафизов И.И. Расчеты теплофизических характеристик реальных газов и газовых смесей при проектировании и эксплуатации средств измерений // Казань: КГТУ, 2004. - 44 с.

4. Хафизов И.И. Электроалмазная резка сверхтвердых и хрупких материалов // Автоматика и электронное приборостроение: II республиканская науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Казань: Изд-во «Экоцентр», 2005. - С. 6-7.

5. Хафизов И.И. Электроалмазная резка твердых и хрупких материалов // XIII Туполевские чтения: материалы междунар. молодежной науч. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. - С. 253-254.

6. Хафизов И.И. Анодно-механическая обработка металлов // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: сб. материалов XVIII всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Казань: Изд-во «Отечество», 2006. Ч. 2. – С. 176-177.

7. Хафизов И.И. Исследование процесса электроалмазной резки прутковых материалов высокой твердости // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, мате-

риалов и изделий: сб. материалов XVIII всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Казань: Изд-во «Отечество», 2006. Ч. 2. - С. 178-179.

8. Хафизов И.И. Интенсификация комбинированного процесса электроалмазной обработки металлов и сплавов и повышение качества обрабатываемости поверхности металлов // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. статей III междунар. науч.-практ. конф. Пенза: ПГТУ, 2006. - С. 64-67.

9. Хафизов И.И. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки, применяемых в технологии приборостроения // Автоматика и электронное приборостроение: III республиканская науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Казань: Изд-во «Экоцентр», 2006. - С. 10-16.

10. Хафизов И.И. Управление процессом комбинированной (электроалмазной) обработки высокотвердых материалов // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: сб. материалов XVIII всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Казань: Изд-во «Отечество», 2006. Ч. 2. – С. 170-176.

11. Хафизов И.И. Оборудование для электроалмазной резки высокотвердых материалов, схемы и режимы// Авиакосмические технологии и оборудование: материалы междунар. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 89-90.

12. Хафизов И.И. Методы повышения технологических и эксплуатационных свойств материалов при применении комбинированных методов обработки // Авиакосмические технологии и оборудование: материалы междунар. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 90-92.

13. Хафизов И.И. Методика расчета технологических параметров при обработке по схеме комбинированного электрохимического разрезания// Авиакосмические технологии и оборудование: материалы междунар. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 92-93.

14. Хафизов И.И. Результаты исследований применения электроалмазной резки прутковых материалов высокой твердости на станке СЭР 901 // XIV Туполевские чтения: материалы междунар. молодежной науч. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. - С. 238-240.

15. Хафизов И.И. Область применения и преимущества электрохимической обработки // XIV Туполевские чтения: материалы молодежной междунар. молодежной науч. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. - С. 236-237.

Подписано в печать 11.04.2007.  
Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 90 экз. Зак. № \_\_  
ГОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"  
394026 Воронеж, Московский просп., 14