

*На правах рукописи*

БОГАЕВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ  
МАЛОГО ДИАМЕТРА В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8

Специальность: 05.03.01 – технологии и оборудование механической и  
физико-технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск, 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
Красильников Борис Александрович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Ситников Александр Андреевич

кандидат технических наук, доцент  
Чёсов Юрий Степанович

**Ведущая организация:** ФГОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет» г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «9» декабря 2009 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2009 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Никитин Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Металлокерамические твердые сплавы получили большое распространение в промышленности и технике: для изготовления инструмента, износостойких изделий, армирования быстро изнашиваемых поверхностей деталей машин и других целей. Однако до сих пор обработка изделий из твердых сплавов связана со значительными трудностями, особенно при шлифовании глубоких отверстий. Обработка ведется в условиях пониженной жесткости технологической системы, повысить ее до обоснованных значений при использовании стандартного оборудования не представляется возможным.

Глубокие сквозные отверстия наиболее часто приходится обрабатывать в твердосплавных деталях пресс-форм, штампов, кондукторных втулок, волоочильном и холодновысадочном инструменте. Отверстия должны отвечать высоким требованиям точности и качества поверхности. Так как твердые сплавы обладают высокой прочностью, то основными способами их обработки являются электрохимико-механические и абразивные. Электрохимико-механические способы не обеспечивают получения требуемых точности и шероховатости обрабатываемой поверхности и применяются в качестве предварительной обработки для съема основного припуска, абразивные способы недостаточно производительны и используются преимущественно для чистовой обработки.

Перспективным способом обработки высокопрочных материалов с точки зрения точности, качества поверхности и производительности является глубинное электроалмазное шлифование (ЭАШ). Однако такая обработка глубоких отверстий затруднена и часто невозможна на стандартном оборудовании, стандартным инструментом, соответственно отсутствуют и технологические рекомендации по данному виду обработки.

В связи с этим совершенствование и создание новых высокопроизводительных способов, обеспечивающих необходимую точность размеров и качество поверхности глубоких отверстий в твердых сплавах, имеют важное практическое и экономическое значение.

**Цель работы** – совершенствование технологии и разработка оборудования для электроалмазного шлифования глубоких отверстий малого диаметра, в изделиях, выполненных из твердого сплава.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи исследования.**

1. Выполнить анализ существующих технологических методов обработки глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава.

2. Теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность применения электроалмазного шлифования для обработки глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава.

3. Выявить влияние ограничивающих факторов на процесс анодного растворения твердого сплава ВК8 при электроалмазном шлифовании применительно к условиям обработки глубоких отверстий малого диаметра.

4. Разработать структурную схему и конструкцию технологической установки для обработки отверстия в детали типа «матрица».

5. Установить функциональные зависимости параметров точности и шероховатости поверхности отверстия от технологических режимов электроалмазного шлифования.

6. Апробировать результаты исследования.

#### **Научная новизна.**

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена схема глубинного электроалмазного шлифования с двухопорным закреплением инструмента обеспечивающая производительность обработки отверстий, с отношением длины к диаметру ( $L/d$ ) = 2...7, до 300 мм<sup>3</sup>/мин, в изделиях, выполненных из твердого сплава ВК8, при обеспечении точности по 7-му качеству и шероховатости поверхности отверстия не выше Ra = 1,25 мкм, со снятием припуска до 3 мм за один проход.

2. Установлены минимальные значения скорости резания  $V_p = 6$  м/с и давления круга на деталь  $P = 0,8$  МПа, позволяющие в условиях непрерывного обновления поверхности снять диффузионные и пассивационные ограничения при глубинном электроалмазном шлифовании глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава ВК8.

3. Разработана структурная схема глубинного электроалмазного шлифования глубоких отверстий малого диаметра с двухопорным закреплением инструмента и создана технологическая установка для ее реализации, включающая:

- привод врезания, обеспечивающий радиальное перемещение шпинделя изделия относительно оси инструмента;
- привод круговой подачи шпинделя изделия;
- привод вращения инструмента;
- двухопорную систему крепления инструмента разнесенную относительно шпиндельного узла;
- систему подачи электролита в зону обработки через опору инструмента.

#### **Практическая ценность.**

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для обработки глубоких отверстий в деталях из твердого сплава по схеме, предложенной в работе.

2. Определены технологические режимы, обеспечивающие высокую производительность электроалмазного шлифования при обработке глубоких отверстий малого диаметра в изделиях, выполненных из твердого сплава.

3. Установлены взаимосвязь параметров шероховатости и точности отверстия от технологических режимов электроалмазного шлифования глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава.

4. На основе проведенных исследований разработана конструкторская документация опытно-промышленной установки, рекомендованной для внедрения в производство.

**Реализация работы.** Результаты выполненной работы апробированы и рекомендованы к внедрению на ОАО «Новосибирский завод химических концентратов» в виде технологического процесса электроалмазного шлифования от-

верстия в твердосплавной матрице. Расчетный экономический эффект составляет 2820859,45 рублей.

**Личный вклад автора.** В работах [2, 6] автором проведены экспериментальные исследования анодного поведения материалов потенциодинамическим методом, обработаны и проанализированы полученные результаты. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментов для оценки механизмов анодного растворения твердого сплава ВК8 в условиях движущегося электролита [7]. Все результаты, изложенные в работах [5, 6], получены лично автором. В работах [1, 4] автором получены данные по твердому сплаву ВК8, в работе [3] автором предложена конструкция инструмента.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» в г. Новосибирске (2005 г.), на Первой всероссийской научно-технической конференции «Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса» в г. Кемерово (2007 г.), VII Всероссийской научно-технической конференции «Механики XXI века» в г. Братске (2008 г.), научных семинарах кафедры «Технология машиностроения» Новосибирского государственного технического университета.

**Методы исследований.** Теоретические и экспериментальные исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения, теории размерной электрохимической обработки, математической статистики.

Представленные в работе результаты получены на основе экспериментальных исследований с использованием приборов и установок для определения характера электрохимического растворения твердого сплава как в стационарных условиях, так и в условиях движущегося электролита и при непрерывном обновлении обрабатываемой поверхности алмазным кругом. Экспериментальные исследования проводились с использованием методов математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты исследований процесса электроалмазного шлифования твердого сплава ВК8.
2. Схема обработки глубоких отверстий малого диаметра в деталях из твердого сплава ВК8.
3. Технологические режимы обработки глубоких отверстий малого диаметра, в деталях, выполненных из твердого сплава ВК8.
4. Технические решения для осуществления схемы обработки глубоких отверстий малого диаметра, в изделиях выполненных из твердого сплава ВК8.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 – в сборниках научных трудов, 2 – в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и приложения. Работа содержит 138 страниц основ-

ного текста, в том числе 12 таблиц, 74 рисунка, список использованных источников из 102 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выполненной работы, дана краткая характеристика состояния проблемы, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** представлено состояние вопроса, выбран объект исследования, определены цели и осуществлена постановка задач исследования.

Объектом исследования является технология обработки глубоких сквозных отверстий в изделиях из твердого сплава ВК8 с отношением длины к диаметру ( $L/d$ ) = 2...7. В работе рассматривается задача обработки отверстия с отношением  $L/d = 45,2/7,8 = 5,8$  в твердосплавной матрице.

Выполнен анализ современного состояния вопроса обработки твердых сплавов абразивным и алмазным шлифованием (Внукова Ю.Н., Грабченко А.И., Савченко Ю.Я., Лавриненко В.И.), электрофизическими и электрохимическими методами (Седыкин Ф.В., Любимов В.В., Давыдов А.Д., Кашеев В.Д., Мороз И.И., Дикусар А.И., Румянцев Е.М., Лилин С.А., Саушкин Б.П., Зайдман Г. Н.), а также комбинированными (Семко М.Ф., Крейчман Б.М., Филимоненко В.Н., Янюшкин А.С.).

Обзор литературных источников показал, что существуют технологические сложности при обработке глубоких отверстий в твердом сплаве. Предварительные способы получения твердосплавных заготовок с отверстиями оставляют большой припуск на последующую обработку (до 2 мм), что связано с низкой точностью данных способов, наличием технологических уклонов, а также дефектного поверхностного слоя.

Отмечено, что внутреннее шлифование глубоких отверстий малого диаметра имеет свои технологические особенности, которые ограничивают использование традиционных способов повышения производительности обработки. Проведенный анализ схемы внутреннего шлифования глубоких отверстий показал, что основным фактором, приводящим к снижению производительности и точности, является низкая жесткость технологической системы СПИД, которая в основном обусловлена нежесткой оправкой инструмента.

**Второй раздел** посвящен описанию методик и оборудования экспериментальных исследований, направленных на изучение особенностей анодного поведения твердого сплава как в стационарных условиях электрохимического растворения, так и при вращающемся дисковом электроде. В качестве материала исследования выбран твердый сплав ВК8 ГОСТ 3882-74 (ИСО 513-75) как имеющий наиболее широкое применение по сравнению с другими представителями твердых сплавов ВК.

На основе анализа используемых в практике электроалмазного шлифования электролитов был сделан выбор 10%-ных водных составов на основе нейтральных неорганических солей –  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ .

Выбраны методики по определению особенностей анодного растворения металлов, основанные на потенциодинамическом методе исследований и методе вращающегося дискового электрода. Оценку технологических параметров обработки твердого сплава ВК8 предложено проводить в условиях непрерывного обновления обрабатываемой поверхности.

При проведении экспериментальных исследований использовались метод ортогонального композиционного планирования эксперимента и метод статистической обработки результатов наблюдений для уровня значимости 0,95. Определены уровни варьирования факторов для проведения предварительного и технологического экспериментов.

**В третьем разделе** приводятся результаты экспериментального исследования анодного растворения и электроалмазной обработки твердого сплава ВК8. Процесс электроалмазной обработки характеризуется комплексом различных по своей природе электрофизико-химических и механических явлений. Съем материала осуществляется в результате совместного воздействия электрохимического растворения и механического резания алмазными зернами. Для анализа факторов, влияющих на точность, качество обработанной поверхности и производительность электроалмазной обработки, проведено исследование электрохимического растворения твердого сплава ВК8 в неподвижном электролите, в движущемся электролите и при непрерывном обновлении поверхности при шлифовании зернами алмазного круга. Растворение твердого сплава в растворах  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  имеет схожий характер и сопровождается пассивационными явлениями. К торможению процесса растворения приводит, как показали эксперименты, пассивация одного из составляющих твердого сплава, а именно вольфрама.

Для оценки влияния диффузионных ограничений анодное поведение твердого сплава ВК8 исследовано методом вращающегося дискового электрода. Установлено, что с увеличением скорости вращения электрода до 2750 об/мин плотность тока возрастает до 50 % по сравнению с растворением в неподвижном электролите, что свидетельствует о наличии диффузионных ограничений. Однако увеличение скорости вращения анода не приводит к исключению зон пассивации при анодном растворении сплава ВК8, это связано с наличием оксидной пленки на поверхности растворения. Для исключения зон пассивации необходимо производить непрерывное удаление пассивирующей окисной пленки с поверхности анода (депассивацию), что возможно в условиях электроалмазного шлифования.

Как показано на рис. 1, при непрерывном обновлении поверхности во всем диапазоне потенциалов отсутствуют участки пассивации. Также следует отметить, что увеличение давления  $P$  до 3,2 МПа в значительной мере влияет на рост плотности тока, а следовательно, и скорость анодного растворения.

Экспериментально установлено, что применение непрерывного обновления при анодном растворении твердого сплава ВК8 приводит к повышению плотности тока в 5 – 5,5 раз по сравнению с растворением сплава в стационарных условиях и в 3 – 3,5 раза по сравнению с растворением в условиях вра-

щающегося дискового электрода при минимальном значении обновляющих параметров  $P = 0,8$  МПа и  $Vp = 6$  м/с.

Установлена зависимость производительности процесса анодного растворения от режимов обработки – скорости резания и давления алмазного круга на деталь – в виде регрессионного уравнения.

Для экспериментального определения влияния скорости резания и давления алмазного круга на деталь на производительность процесса электроалмазного шлифования проведен эксперимент с использованием методов математического планирования. В качестве параметра оптимизации принята объемная производительность процесса  $Q$ , мм<sup>3</sup>/мин. При этих же режимах обработки фиксировались значения удельного износа алмазного круга.

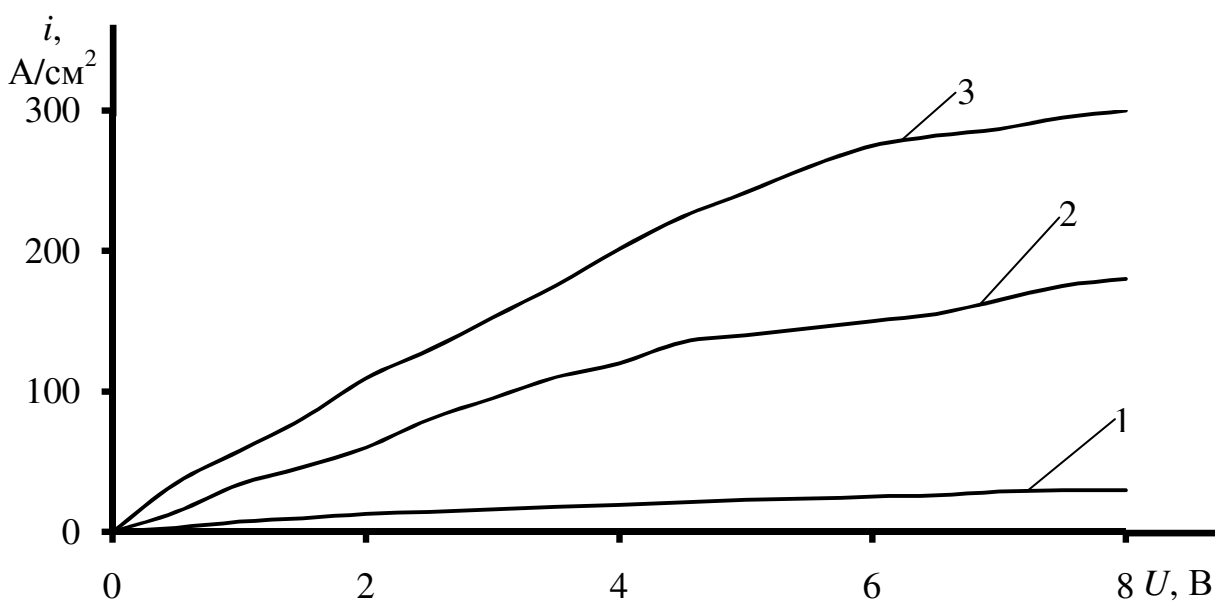


Рис. 1. Вольтамперная зависимость процесса электроалмазного шлифования твердого сплава ВК8 в 10%-ном растворе  $\text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ :  
 1 –  $P = 0,8$  МПа,  $Vp = 6$  м/с; 2 –  $P = 2$  МПа,  $Vp = 24$  м/с;  
 3 –  $P = 3,2$  МПа,  $Vp = 15$  м/с

Реализация матрицы планирования полнофакторного эксперимента  $2^3$ , включающего в себя 9 опытов, позволила определить значение параметров оптимизации и установить зависимость объемной производительности и удельного износа в виде регрессионных уравнений. После оценки уровня значимости коэффициентов уравнения приняли вид

$$Q = -70,7 + 4,05X_1 + 94,57X_2 - 18,98X_2^2, \quad (1)$$

$$q = 3,6 - 0,49X_1 - 1,3X_2 + 0,27X_2^2. \quad (2)$$

На рис. 2 и 3 представлены поверхности откликов, описываемых уравнениями (1) и (2) соответственно.



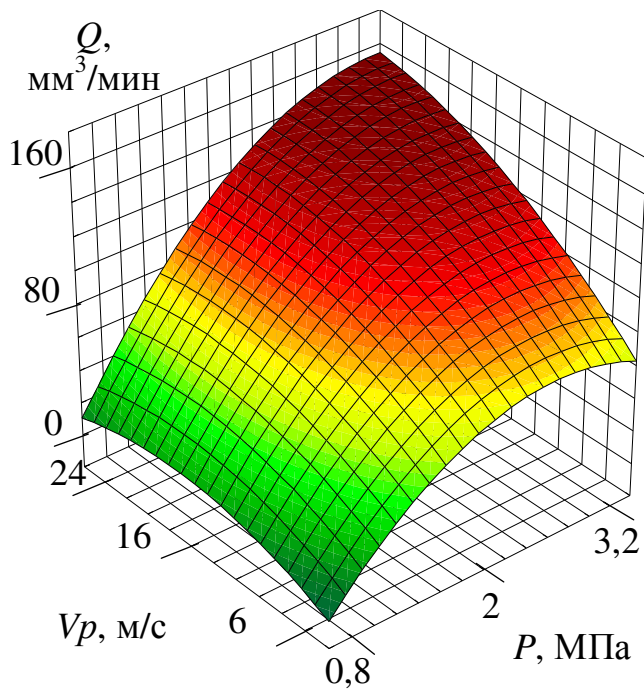


Рис. 2. Зависимость объемной производительности ( $Q$ ) электроалмазного шлифования твердого сплава ВК8 от давления круга на деталь ( $P$ ) и скорости резания ( $V_p$ ) в 10%-ном водном растворе  $\text{NaNO}_3$ ,  $U = 8$  В, описываемое уравнением (1)

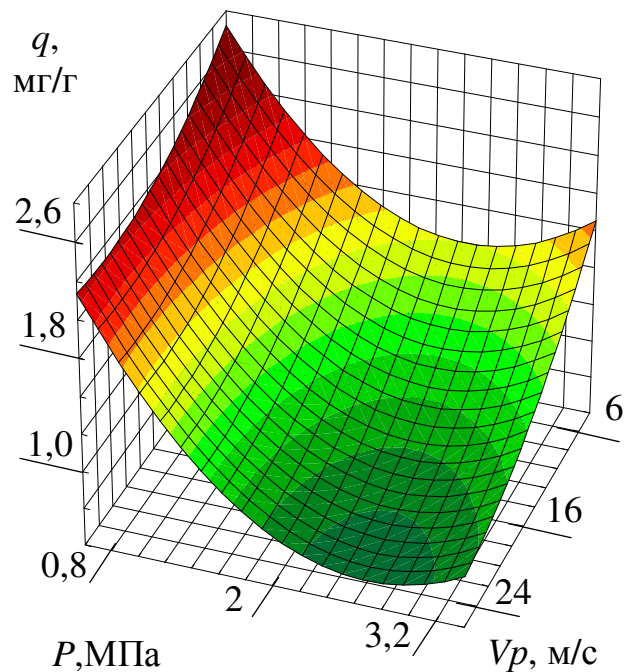


Рис.3. Зависимость относительного износа алмазного круга ( $q$ ), в условиях электроалмазного шлифования твердого сплава ВК8, от давления круга на деталь ( $P$ ) и скорости резания ( $V_p$ ) в 10%-ном водном растворе  $\text{NaNO}_3$ ,  $U = 8$  В, описываемое уравнением (2)

Максимальная производительность отмечена при  $P = 3,2$  МПа и  $V_p = 15$  м/с и использовании в качестве электролита  $\text{NaNO}_3$ . Выявлено, что при давлении свыше  $P = 3,2$  МПа наблюдается эрозионный процесс, приводящий к оплавлению как поверхности обрабатываемой детали, так и связки круга.

Определена область рациональных режимов шлифования: скорость резания  $V_p = 10 \dots 20$  м/с и  $P = 2 \dots 2,5$  МПа. Данная область режимов характеризуется сравнительно высокой производительностью и малым износом инструмента, не превышающим 1,5 мг/г.

**В четвертом разделе** работы рассмотрены технологические вопросы ЭАШ глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава.

При обработке внутренних поверхностей вращения инструмент устанавливается внутри отверстия. Его вылет должен быть больше длины обрабатываемого отверстия, и чем меньше диаметр отверстия, тем менее жестким будет инструмент. Проведенный анализ факторов, влияющих на точность шлифования отверстий методом продольной подачи, показал, что традиционная схема внутреннего шлифования продольной подачей не обеспечивает заданной точности обработки. Установлено, что наибольший вклад в погрешность обработки вносит упругое отжатие инструмента, вызванное его нежесткой оправкой.

Внутреннее шлифование характеризуется значительной дугой контакта, что приводит к быстрому износу круга и прижогам вследствие высоких темпе-

ратур в зоне контакта. В случае применения электроалмазного шлифования большая дуга контакта позволяет повысить производительность обработки за счет увеличения электрохимического съема. Целесообразно вести обработку с большими глубинами резания (до 3 мм), – так называемым глубинным шлифованием (в данной работе – до 1,1 мм).

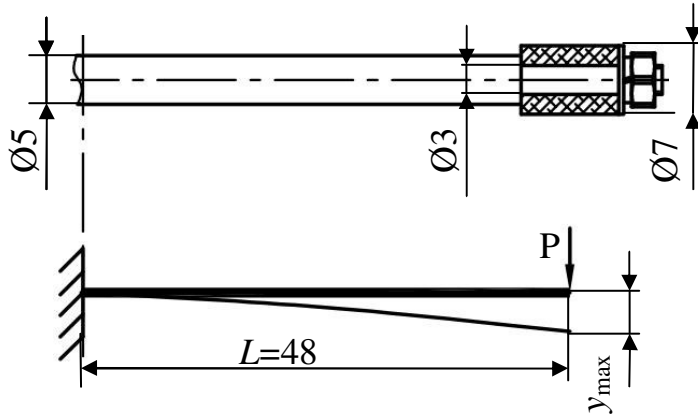


Рис. 4. Расчетная схема консольного закрепления инструмента,  $j = 0,18$  кН/мм

жуют до 2...5 мм/мин. Данный метод обработки позволяет при заданном качестве обработки существенно повысить производительность. Однако глубинное

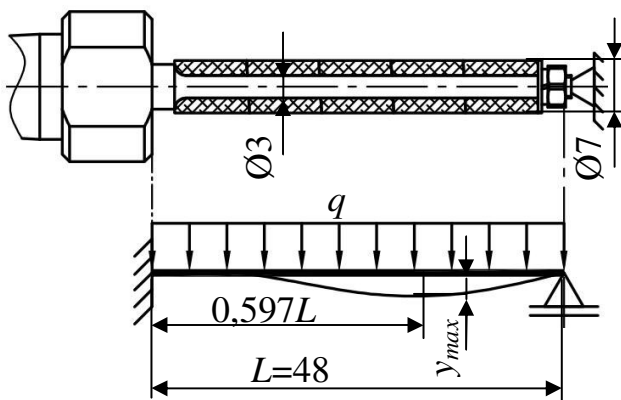


Рис. 5. Расчетная схема двухопорного закрепления инструмента с цельной оправкой,  $j = 44$  кН/мм

при использовании дополнительной опоры жесткость инструмента по сравнению с традиционной схемой шлифования методом продольной подачи с консольным закреплением инструмента ( $j = 0,18$  кН/мм) увеличивается в 55 раз и составляет 44 кН/мм.

Как известно, жесткостью технологической системы называется способность этой системы оказывать сопротивление действию деформирующих ее сил. Одним из основных способов повышения точности обработки является умень-

Глубинное шлифование является высокопроизводительным методом абразивной обработки. Высокая производительность данного метода обработки обеспечивается значительным съемом обрабатываемого материала. Глубинное шлифование также называют однопроходным, так как весь припуск на обработку снимают за один проход. В случае применения глубинной схемы обработки скорость круговой подачи снижают до 2...5 мм/мин. Данный метод обработки позволяет при заданном качестве обработки существенно повысить производительность. Однако глубинное точное шлифование невозможно в условиях пониженной жесткости системы СПИД.

Сравним жесткость консольного и двухопорного типов закрепления оправок (рис. 4 и 5), здесь  $y_{max}$  – максимальный прогиб стержня;  $P$  – сосредоточенная сила;  $L$  – длина, на которой определяется максимальный прогиб. Полученные данные показывают, что использование дополнительной опоры для инструмента позволяет значительно повысить его жесткость и снизить упругие отжатия. Таким образом,

шение упругих отжатый технологической системы посредством повышения жесткости. Повысив жесткость, соответственно можно повысить точность и производительность обработки.

Схема электроалмазного шлифования глубоких отверстий малого диаметра, обеспечивающая высокую производительность и точность обработки, показана на рис. 6. Для повышения жёсткости инструмента, предложено использовать дополнительную опору (поз. 5 рис. 6). Кинематика процесса обработки твердосплавных матриц следующая. Инструмент совершает одно главное движение резания – вращение  $B1$ . Деталь совершает два движения: врезания –  $\Pi3$  и круговой подачи –  $B2$ , которые обеспечиваются специальным приспособлением.

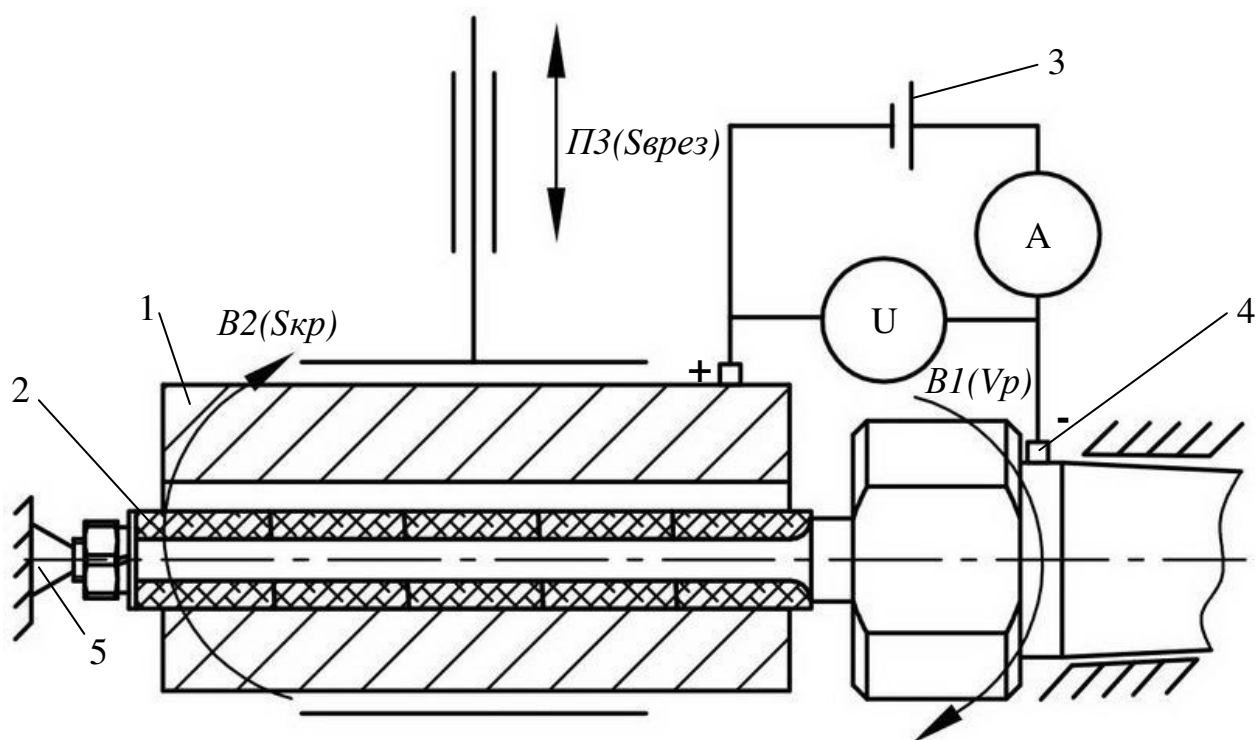


Рис. 6. Схема глубинного ЭАШ глубоких отверстий:

$B1$  – главное движение резания,  $B2$  – движение круговой подачи;  $\Pi3$  – движение врезания,  $A$  – амперметр,  $V$  – вольтметр; 1 – деталь (анод), 2 – инструмент (катод), 3 – источник технологического тока, 4 – токоподвод, 5 – дополнительная опора

Следует отметить, что обработка по предложенной схеме невозможна при использовании существующего оборудования, для ее реализации необходима его модернизация либо создание нового.

Для определения влияния режимов шлифования на точность и шероховатость обработанного отверстия в изделиях из твердого сплава ВК8, проведено исследование на созданной экспериментальной установке с использованием метода многофакторного планирования эксперимента. В ходе эксперимента использовалась система с двухопорным закреплением инструмента (рис. 5). В качестве параметров исследования приняты точность диаметра  $\Delta d$ , мкм, шероховатость поверхности  $Ra$ , мкм, прогиб оправки  $y$ , мкм, относительный износ

круга  $q$ , мг/г. Глубина резания  $t$ , мм, напряжение  $U$ , В, и скорость круговой подачи  $Skp$ , мм/мин, выбраны в качестве переменных факторов. Уровни варьирования были определены на основе предварительных экспериментов. Реализация матрицы планирования для центрального ортогонального композиционного плана, включающая в себя 15 опытов, позволила определить значения параметров оптимизации и рассчитать величины коэффициентов уравнения регрессии второго порядка. После определения значимости коэффициентов уравнения приняли вид:

$$y = -0,61 - 0,14X_1 + 0,7X_2 + 1,2X_3 - 0,6X_3^2 + 0,09X_2X_2 - 0,0125X_1X_3, \quad (3)$$

$$\Delta d = 13,7 + 0,2X_1 - 0,3X_2 - 0,18X_3 + 0,08X_3^2 + 0,16X_1X_3, \quad (4)$$

$$q = 0,77 + 0,21X_1 - 0,14X_2 + 0,1X_3 + 0,012X_2^2 + 0,016X_3^2 + 0,056X_1X_2. \quad (5)$$

$$Ra = 0,87 - 0,23X_1 - 0,018X_2 + 0,024X_3 + 0,02X_1X_2, \quad (6)$$

Для выявления зависимости параметров исследования от управляющих факторов рассматривались поверхности отклика при фиксированном среднем значении одного из трех факторов. На рис. 7 – 10 представлены поверхности откликов, описываемых уравнениями 3 – 6 соответственно.

Точность и шероховатость глубоких отверстий в изделиях из твердого сплава ВК8, в условиях обработки по предложенной схеме, в большей степени определяется круговой подачей. Увеличение круговой подачи приводит к росту давления алмазного круга на деталь, что в свою очередь увеличивает прогиб оправки. Также при этом увеличивается износ круга, так как возрастает нагрузка на алмазные зерна; увеличивается шероховатость отверстия вследствие увеличения глубины внедрения алмазных зерен.

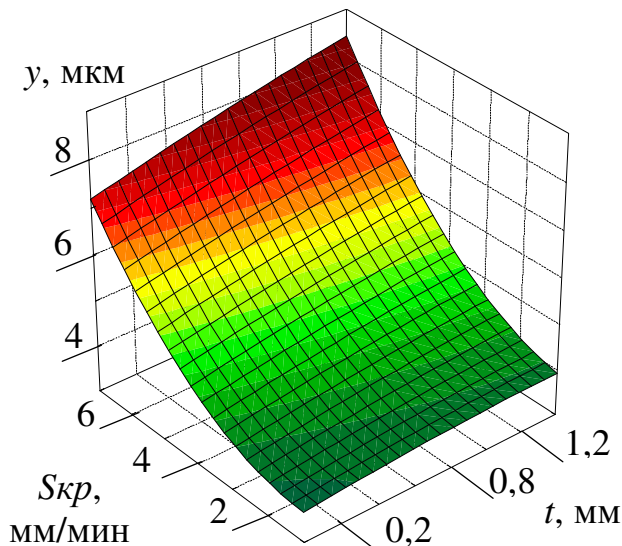


Рис. 7. Влияние глубины резания ( $t$ ) и круговой подачи ( $Skp$ ) на прогиб оправки ( $y$ ), 10 %-ный водный раствор  $NaNO_3$ ,  $U = 8$  В,  $Vp = 9,5$  м/с, описываемое уравнением (3)

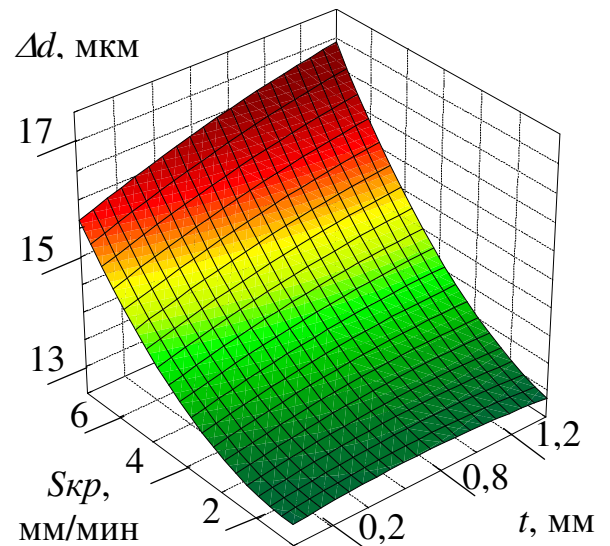


Рис. 8. Влияние глубины резания ( $t$ ) и круговой подачи ( $Skp$ ) на точность диаметра отверстия ( $\Delta d$ ), 10 %-ный водный раствор  $NaNO_3$ ,  $U = 8$  В,  $Vp = 9,5$  м/с, описываемое уравнением (4)

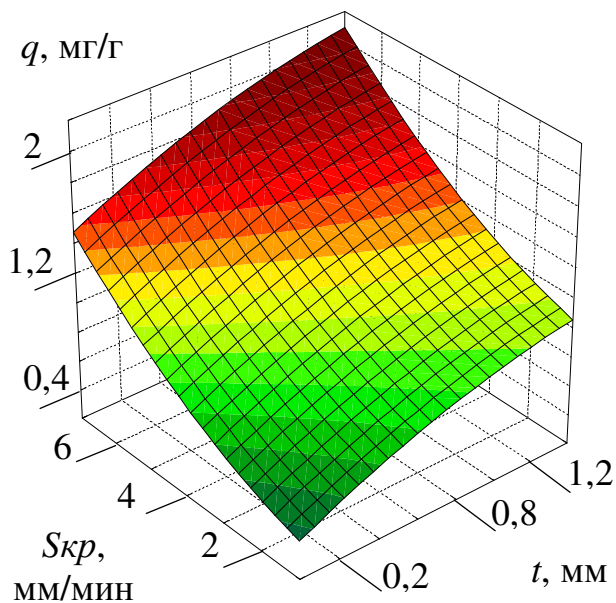


Рис. 9. Влияние глубины резания ( $t$ ) и круговой подачи ( $S_{кр}$ ) на относительный износ алмазного круга ( $q$ ), 10 %-ный водный раствор  $\text{NaNO}_3$ ,  $U = 8$  В,  $V_p = 9,5$  м/с, описываемое уравнением (5)

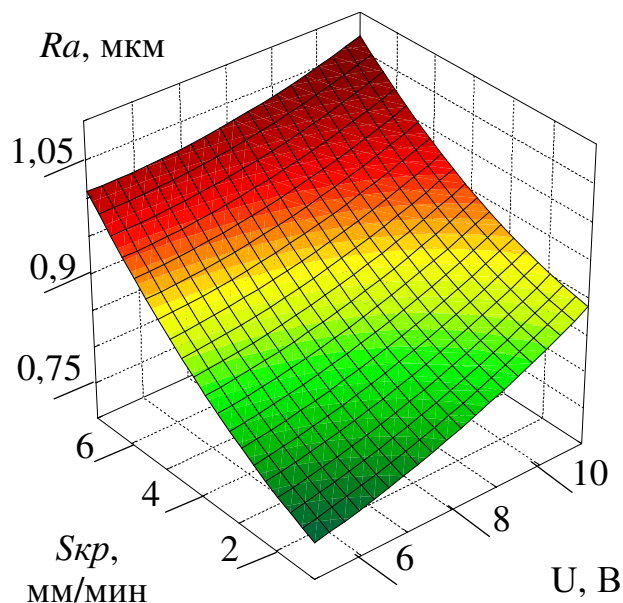


Рис. 10. Влияние напряжения ( $U$ ) и круговой подачи ( $S_{кр}$ ) на шероховатость отверстия ( $Ra$ ), 10 %-ный водный раствор  $\text{NaNO}_3$ ,  $t = 0,7$  мм,  $V_p = 9,5$  м/с, описываемое уравнением (6)

На обработанной поверхности после ЭАШ образуется дефектный слой в результате электрохимического растравливания материала. Установлено, что при обработке глубоких отверстий малого диаметра по предложенной технологии толщина дефектного слоя не превышает 5 мкм. Наименьшая шероховатость обработанного отверстия  $Ra = 0,78$  мкм, была получена при  $t = 1,1$  мм,  $U = 6$  В,  $S_{кр} = 2$  мм/мин.

**В пятом разделе** приведены технические решения по созданию экспериментальной установки для ЭАШ глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава. В главе представлены кинематическая схема установки, описание, разработка и расчет приводов врезания и круговой подачи, а также привода инструмента. Показаны конструкции инструмента и дополнительной опоры для него.

Предложенная технология обработки может быть реализована путем модернизации серийно выпускаемого оборудования. Внутришлифовальные станки моделей 3К225, 3К227, 3К228, 3А225, 3К12М, исходя из своего предназначения более предпочтительны, так как обладают достаточной жесткостью станины.

В качестве инструмента для электроалмазного шлифования отверстий использовались алмазные круги на металлической связке, формы А8  $L = 10$  мм,  $D = 8$  мм,  $d = 3$  мм (ГОСТ 16168-91), концентрация алмазов – 100 %, зернистость – 80/63. Так как длина отверстия (45,2 мм) больше длины круга (10 мм), то для достижения необходимой длины инструмента на оправку устанавливалось пять кругов. Для того чтобы на поверхности отверстия не оставались канавки в месте стыка кругов, торцы кругов обрабатывались под углом  $3^0$  к оси круга.

На рис. 11 показана деталь типа «матрица» до и после обработки отверстия. На рис. 12 представлены инструментальные оправки и алмазный круг. В работе использован инструмент с цельной оправкой, имеющий большую жесткость. Однако, возможно использование инструмента с составной оправкой, как более технологичного, в случае, если его жесткости достаточно.

Для реализации предложенной технологии обработки глубоких отверстий малого диаметра в деталях из твердого сплава разработана экспериментальная установка на базе внутришлифовального станка модели 3А225 (рис. 13 и 14).

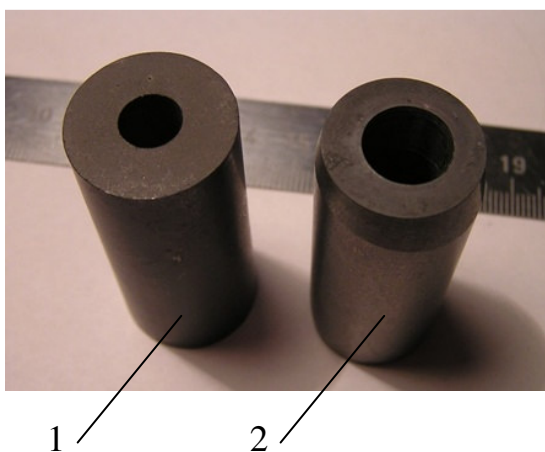


Рис.11. Обработанная деталь-«матрица»: 1 – до обработки; 2 – после обработки

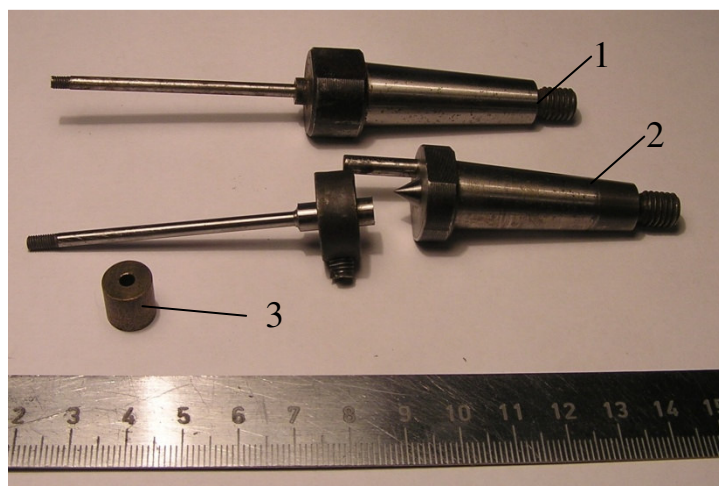


Рис.12. Оправки инструментальные: 1 – цельная оправка; 2 – составная оправка; 3 – алмазный круг



Рис.13. Рабочая зона экспериментальной установки



Рис.14. Общий вид экспериментальной установки

Результаты работы апробированы на ОАО «Новосибирский завод химических концентратов», что подтверждено актом промышленного апробирования результатов кандидатской диссертационной работы. По результатам работы

разработана конструкторская документация для модернизации шлифовального станка 3К12М для промышленного применения.

### **Основные результаты и выводы**

1. Установлено, что главным препятствием повышения производительности и точности обработки при шлифовании глубоких отверстий малого диаметра является низкая жесткость технологической системы.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения электроалмазного шлифования глубоких отверстий малого диаметра при использовании схемы двухопорного закрепления инструмента

3. Экспериментально установлено, что при стационарной электрохимической обработке твердого сплава ВК8 имеют место диффузионные и пассивационные ограничения, для устранения которых необходимо обеспечить движение электролита в межэлектродном зазоре и непрерывное обновление обрабатываемой поверхности в процессе анодного растворения. При использовании 10%-ных водных растворов электролитов  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  установлено, что непрерывное обновление поверхности анода (обрабатываемой поверхности) при анодном растворении твердого сплава ВК8 сопровождается повышением плотности тока в 5 – 5,5 раз по сравнению с растворением сплава в стационарных условиях.

4. Выявлены минимальные значения обновляющих факторов скорости резания ( $V_p = 6$  м/с) и давления круга на деталь ( $P = 0,8$  МПа), обуславливающие снятие диффузионных и пассивационных ограничений при глубинном электроалмазном шлифовании глубоких отверстий малого диаметра в изделиях из твердого сплава ВК8.

5. Разработана структурная схема и технологическая установка для реализации предложенной схемы обработки, включающая:

- привод врезания, обеспечивающий радиальное перемещение шпинделя относительно оси инструмента;
- привод круговой подачи шпинделя;
- привод инструмента;
- двухопорную систему крепления инструмента, разнесенную относительно шпиндельного узла;
- систему подачи электролита в зону обработки через опору инструмента.

6. На основе выявленных функциональных зависимостей установлены рациональные значения режимов электроалмазного шлифования, в 10 %-ном водном растворе  $\text{NaNO}_3$ , отверстия  $\varnothing 9,8^{+0,013}$  длиной 45,2 мм, выполненного в изделии из твердого сплава ВК8, обеспечивающие производительность обработки до  $Q = 200$  мм<sup>3</sup>/мин, шероховатость не выше  $Ra = 1,25$  мкм, относительный износ инструмента не более  $q = 1,5$  мг/г:

- скорость круговой подачи  $S_{кр} = 3...4$  мм/мин;
- скорость врезания  $S_{врез} = 1...2$  мм/мин;
- скорость резания  $V_p = 10...20$  м/с;
- глубина резания  $t = 0,7...1,1$  мм;
- напряжение технологического тока  $U = 7...9$  В.

7. Проведена промышленная апробация результатов диссертационной работы на ОАО «Новосибирский завод химических концентратов». Разработана конструкторская документация для модернизации шлифовального станка 3К12М. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов исследования в производство составляет 2820859,45 руб.

**Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в следующих работах.**

1. Изучение процесса анодного растворения ЖС6 и ВК8 методом вращающегося дискового электрода / Х. М. Рахимьянов, Б. А. Красильников, М. И. Никитенко, А. А. Богаев // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: труды 1-й всероссийской науч.-технич. конф., 24 – 25 октября 2007 г. – Кемерово ГУ «КузГТУ», 2007. – С. 255 – 259.

2. Красильников Б. А. Исследование анодного поведения твердого сплава ВК8 и его составляющих в нейтральных электролитах / Б. А. Красильников, А. А. Богаев // Научный вестник НГТУ. – 2008. – №2 (31) – С. 86 – 98.

3. Богаев А. А. Обработка глубоких отверстий в высокопрочных материалах / А. А. Богаев, Б. А. Красильников // Механики XXI века: сборник докладов VII межд. науч.-техн. конф. 18 – 20 марта 2008 – Братск, 2008. – С. 135 – 138.

4. Исследование производительности электроалмазной обработки жаропрочного сплава ЖС6 и твердого сплава ВК8 / Х. М. Рахимьянов, Б. А. Красильников, М. И. Никитенко, А. А. Богаев // Обработка металлов – 2007. – №3 (28). – С. 12 – 13.

5. Красильников Б. А. Исследование анодного поведения твердого сплава ВК8 в различных электролитах / Б. А. Красильников, А. А. Богаев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – №4 (46). – С. 87 – 92.

6. Красильников Б. А. Исследование производительности электроалмазной обработки твердого сплава ВК8 / Б. А. Красильников, А. А. Богаев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2007. – №2 (48). – С. 75 – 80.

7. Красильников Б. А. Определение особенностей анодного растворения твердого сплава ВК8 методом вращающегося дискового электрода / Б. А. Красильников, А. А. Богаев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2007. – №3 (49). – С. 95 – 100.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Марка, 20, тел. 346-08-57  
Формат 60×84/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.,  
Заказ № \_\_\_\_, подписано в печать \_\_\_\_\_ 2009 г.