

Архипов Павел Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ ПУТЕМ
УСТРАНЕНИЯ ИХ ЗАСАЛИВАНИЯ**

Специальность: 05.02.07

Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010г.

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения»

ГОУ ВПО «Братского государственного университета»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Янюшкин Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Попов Андрей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент
Брюхов Вячеслав Владимирович

Ведущая организация: Национальный исследовательский Иркутский
государственный технический университет

Защита состоится ____ октября 2010 г. в __ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу:
634050, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «__» сентября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 212.269.01
кандидат технических наук, доцент

Костюченко Т.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важной задачей машиностроения является повышение качества и эксплуатационных свойств изделий из высокопрочных материалов. Достигнуть высоких качественных показателей в процессе обработки не всегда возможно, поскольку, современные материалы требуют создания прогрессивных технологий, позволяющих наиболее эффективно использовать возможности существующего технологического оборудования. Операции шлифования являются основными при финишной обработке изделий из инструментальных, а также труднообрабатываемых и композиционных материалов и сплавов. При плоском шлифовании обработка деталей ведется кругами на основе карбида кремния, электрокорунда и др. Применение таких инструментов в некоторых случаях приводит к снижению качества деталей с образованием прижогов, трещин и других дефектов за счет возникновения в локальных точках высоких температур и напряжений, особенно это характерно для твердосплавных и сверхтвердых материалов. Алмазные круги на металлической связке имеют ряд преимуществ перед обычными абразивными кругами, но основной причиной, по которой они не находят широкого применения является потеря режущей способности в процессе обработки из-за их засаливания, особенно при шлифовании композиционных твердосплавных материалов. Восстановление режущих свойств является длительной и трудоемкой операцией, требующей значительных затрат времени и средств. Это оказывает существенное влияние на качество изделий, производительность процесса, а также на себестоимость и конкурентоспособность готовой продукции.

В связи с этим актуальным является изучение механизмов и природы образования засаленного слоя, определение путей повышения режущих свойств алмазных кругов на металлической связке при обработке композиционных твердосплавных материалов комбинированным электроалмазным шлифованием.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой кафедры технология машиностроения – «Теоретические основы комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов» при финансовой поддержке грантов в рамках проекта 2.1.2./5996 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» – «Основные закономерности микроконтактных процессов комбинированной электроалмазной обработки композиционных и сверхтвердых материалов»; гранта по программе «У.М.Н.И.К.» – «Совершенствование технологической подготовки производства и методов обработки материалов», а также в рамках мероприятия 1.4. «Развитие внутрироссийской мобильности научных и научно-педагогических кадров путем выполнения научных исследований молодыми учеными и преподавателями в научно-образовательных центрах» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Цель работы. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердых сплавов путем устранения их засаливания за счет реализации комбинированного электроалмазного метода.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

- исследовать и теоретически обосновать механизм образования засаленного слоя на рабочей поверхности алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при плоском шлифовании;
- исследовать процесс комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке, получить математические зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a , удельного расхода шлифовального круга q и эффективной мощности резания $N_{эф}$ от режимов комбинированного электроалмазного шлифования;
- определить рациональные режимы плоского комбинированного электроалмазного шлифования, обеспечивающие высокое качество обработанной поверхности и эффективность процесса обработки твердых сплавов;
- разработать рекомендации по модернизации плоскошлифовальных станков для реализации процессов комбинированного электроалмазного шлифования.

Методы исследования:

Теоретические исследования выполнены на основе классических законов электрофизики и электрохимии, научных основ машиностроения.

Экспериментальные исследования проведены на плоскошлифовальном станке модели 3E711, модернизированном под процессы комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой круга. Математические модели получены на основе теории планирования экспериментов.

Опытные образцы алмазного шлифовального круга и обработанная поверхность твердого сплава исследовались с использованием современной аппаратуры: рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA, растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 со встроенным химическим анализатором EDS X-Act, оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, а также оптического интерферометра Zygo New View TM 7300. Шероховатость обработанной поверхности исследовалась на профилограф-профилометре «Абрис – ПМ7».

Достоверность:

Основные научные положения, выводы и результаты, сформулированные в диссертационной работе, обоснованы и подтверждены результатами экспериментальных и производственных испытаний. Достоверность и воспроизводимость опытов – результатами статистической обработки экспериментальных данных.

На защиту выносятся:

- результаты исследования потери режущих свойств алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердых сплавов;
- разработанная методика расчета величины засаленного слоя и механизм его образования при обработке твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке;
- математические зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a , удельного расхода шлифовального круга q и эффективной мощности резания $N_{эф}$ от режимов комбинированной электроалмазной обработки при шлифовании твердых сплавов;
- результаты экспериментального определения рациональных режимов комбинированного плоского электроалмазного шлифования твердых сплавов;
- модернизированная конструкция плоскошлифовального станка 3E711 для реализации процессов комбинированного электроалмазного шлифования.

Научная новизна:

- теоретически обоснован механизм образования засаленного слоя, основанный на классическом представлении о строении двойного электрического слоя, а также предложена методика расчета величины засаленного слоя при обработке твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке;
- получены математические зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a , удельного расхода шлифовального круга q и эффективной мощности резания $N_{эф}$ от режимов комбинированного электроалмазного шлифования твердого сплава ВК8;
- разработан и реализован метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления (Патент РФ № 2304504), позволившие повысить режущие свойства алмазных кругов на металлической связке.

Практическая ценность работы:

- определены рациональные технологические режимы плоского комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке, позволяющие расширить технологические возможности оборудования и обеспечить высокое качество обрабатываемых деталей;
- разработаны рекомендации по модернизации плоскошлифовальных станков для реализации процессов комбинированного электроалмазного шлифования на оборудовании общего машиностроительного назначения.

Реализация и внедрение результатов работы:

Полученные результаты внедрены и используются на Братском алюминиевом заводе, ООО «Тимокс», ОАО «ЦРМЗ», в учебном процессе ГОУ ВПО «Братский государственный университет», а также использованы в написании отчетов при выполнении научно-исследовательских работ в рамках полученных грантов.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах с международным участием: «Механики XXI века», г. Братск (2005г., 2006г., 2007г.); «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири», г. Братск (2007г., 2008г.); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск (2007г., 2008г., 2009г.); XII – XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения», г. Красноярск (2008г., 2009г.); Международной научной конференции «Проблемы механики современных машин», г. Улан-Удэ (2009г.). Работа отмечена дипломом 1–ой степени на Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» – НТИ-2007 (г. Новосибирск); дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Ползуновские Гранты», г. Барнаул (2007г.); дипломом за участие в финальном туре конкурса по программе «У.М.Н.И.К.», г. Новосибирск (2008г.); золотой медалью международного конкурса «Качество товаров и услуг», ЕВРАЗИЯ – 2009. Работа обсуждена и одобрена на научно-методических семинарах кафедр: «Технология машиностроения» ГОУ ВПО «БрГУ», «Технология автоматизированного машиностроительного производства» Национального исследовательского Томского политехнического университета, факультета «компьютерные технологии в машиностроении» Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета.

Публикации: По материалам диссертационного исследования опубликовано 17 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, а также 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Основной текст содержит 178 страниц, 61 рисунок, 10 таблиц, список литературы, включающий в себя 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы и представлена общая характеристика диссертации. Сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен обзор научных работ, касающихся причин потери режущих свойств, шлифовальных кругов и физической природы их изнашивания при обработке композиционных твердых сплавов и сверхтвердых материалов, показаны недостатки и преимущества электроалмазного шлифования, а так же основные аспекты качества при шлифовании, состав электролита и его влияние на процессы электроалмазного шлифования.

Вопросам потери режущих свойств и эффективности применения кругов из сверхтвердых материалов посвящены работы Лоладзе Т.Н., Резникова А.Н., Бокучавы Г.В., Семко М.Ф., Грабченко А.И., Захаренко И.П., Рыжова В.В., Седыкина Ф.М., Чеповецкого И.Х., Смоленцева В.П., Попова С.А., Мишнаевского Л.Л., Панова А.А., Янюшкина А.С. и др. Исследования показывают, что алмазные круги на металлических связках могут эффективно использоваться только в специфических условиях с использованием электрофизических методов обработки, в том числе и комбинированного электроалмазного метода шлифования.

Установлено, что режущая способность шлифовального круга снижается в процессе работы вследствие многочисленных факторов, из которых в числе основных можно выделить такие как изнашивание зерен и засаливание его рабочей поверхности. Наиболее интенсивно шлифовальные круги на металлической связке теряют свою режущую способность вследствие засаливания.

Исследованию процессов засаливания посвящены работы Т. Н. Лоладзе, Г.В. Бокучавы, Ю.В. Полянскова, Ю.М. Правикова, С.Н. Корчака, И.Х. Чеповецкого, Л.В. Худобина, А.С. Янюшкина и других исследователей. Однако единой точки зрения на природу взаимодействия контактирующих поверхностей при шлифовании, в том числе и процесс засаливания, не выработано.

Основным механизмом изнашивания кругов из сверхтвердых материалов, по мнению многих авторов, является хрупкое разрушение алмазного зерна и вырывание из связки целых зерен. Если алмазные зерна недостаточно прочно удерживаются связкой, то они вырываются прежде, чем успевают затупиться, при этом в микрорезании участвует лишь малая доля режущих зерен, а экономическая целесообразность обработки кругами из сверхтвердых материалов снижается. Значительную роль в изнашивании кругов из сверхтвердых материалов играют также адгезионные, диффузионные и термоусталостные явления.

Таким образом, на основании оценочных характеристик процесса шлифования, а также путей повышения режущих свойств алмазных кругов на металлической связке можно сделать следующие выводы:

- проблема потери шлифовальными кругами режущей способности, в частности алмазными кругами на металлической связке, в виду такого явления как засаливание, по-прежнему является актуальной;
- большинство традиционных методов правки и восстановления режущих свойств шлифовальных кругов являются либо устаревшими, либо далеки от совершенства;
- эффективным способом повышения режущих свойств алмазных кругов на металлической связке является применение современных электрофизических и электрохимических методов обработки твердых сплавов;
- наиболее перспективным для плоского шлифования твердых сплавов является комбинированная электроалмазная обработка кругами на металлической связке.

На основании вышеизложенного, сформулированы цель и основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена методикам проведения исследований и проблеме потери режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердых сплавов, связанная с таким явлением как засаливание.

На рис.1. представлено модернизированное оборудование, на котором выполнен основной комплекс экспериментальных исследований.



Рис.1. Станок 3E711, модернизированный для реализации комбинированного электроалмазного шлифования

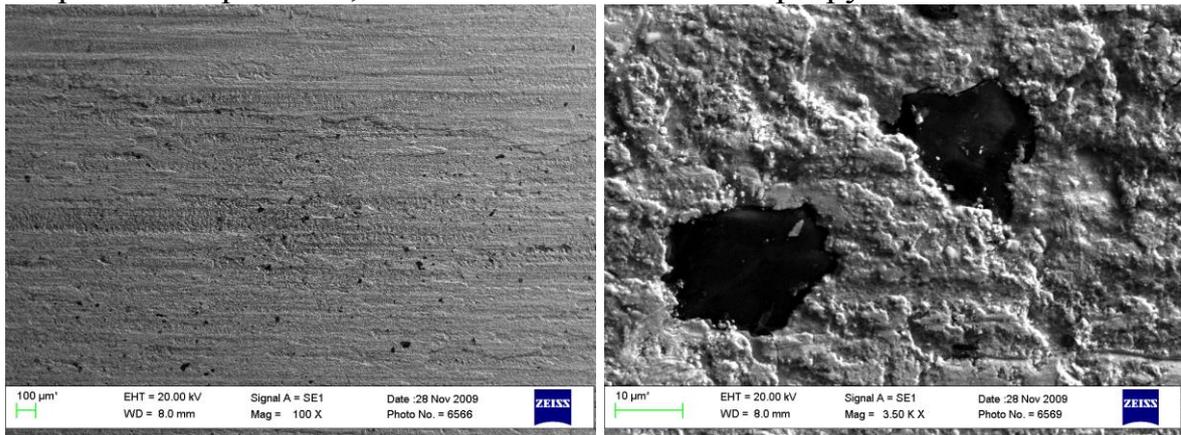
Исследования образцов алмазного круга АС6 после шлифования твердого сплава ВК8, позволили определить очаги образования засаленного слоя (рис.2,а,б; рис.3).

Во время обработки твердый сплав образует навалы на боковой поверхности алмазных зерен и налипсы (нарост) на вершинах, которые, взаимодействуя со связкой, способствуют развитию засаливания.

Такая поверхность шлифовального круга фактически теряет режущие свойства, а дальнейшая обработка приводит к росту засаленного слоя, который полностью скрывает алмазные зерна (рис.4, на котором приведен поперечный разрез алмазного круга).

Сформировавшийся на поверхности алмазного круга засаленный слой создает в зоне резания условия, при которых непосредственное резание алмазными зернами отсутствует, переходит в трение этого слоя о поверхность обрабатываемой детали, сопровождающееся появлением дефектов на твердом сплаве (рис.5. и рис.6).

Далее за счет возрастания силовых и ударных нагрузок, а также теплового воздействия обрабатываемая поверхность покрывается сплошной сеткой трещин и в зависимости от времени обработки, частично или полностью разрушается.



а) увеличение $\times 100$

б) увеличение $\times 3500$

Рис.2. Засаленный слой на поверхности круга AC6 M2-01

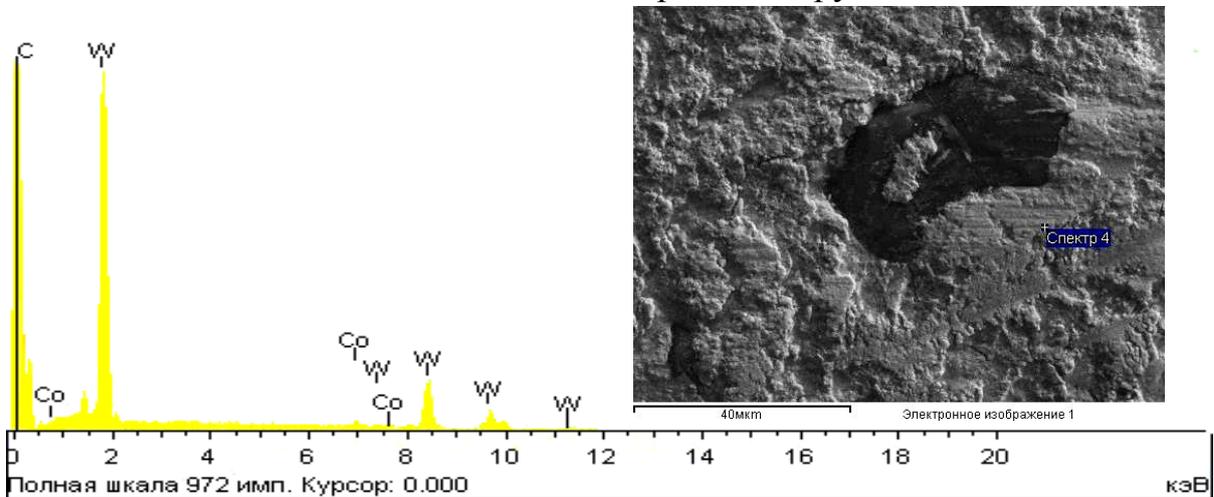
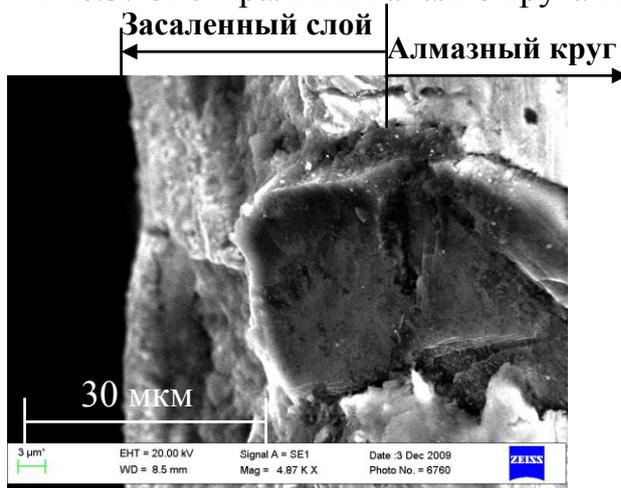


Рис.3. Спектральный анализ круга AC6 после шлифования сплава BK8



а) увеличение $\times 5000$

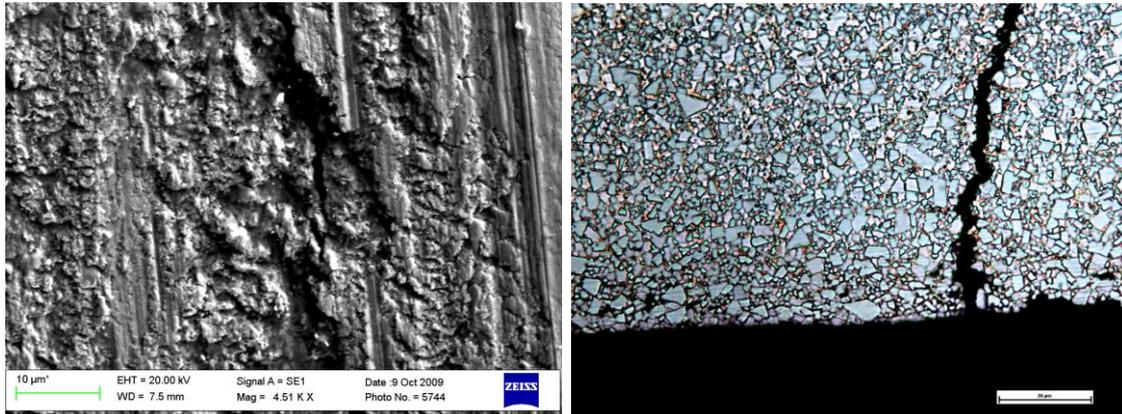
Материал и время обработки	Элемент	Весовой состав, %	Атомный состав, %
Эталон AC6	C	33,8	76,01
	Cu	45,2	19,21
	Sn	21,0	4,78
AC6 (15 мин)	C	47,84	89,65
	Co	4,13	4,47
	W	48,03	5,88
AC6 (30 мин)	C	41,88	91,2
	Co	1,77	0,78
	W	56,36	8,02

б) состав засаленного слоя

Рис.4. Засаленный слой на поверхности круга AC6 M2-01 поперечный разрез

Как показывает спектральный анализ поверхности алмазного круга AC6 засаленный слой после 15-ти минут шлифования твердого сплава BK8 состоит из вольфрама, который сосредоточен в зоне боковых поверхностей алмазных зерен. Рентгеноструктурный анализ поверхности алмазного круга AC6 после 15-ти минут шлифования твердого сплава BK8 показал, что засаленный слой состоит из фаз карбида вольфрама

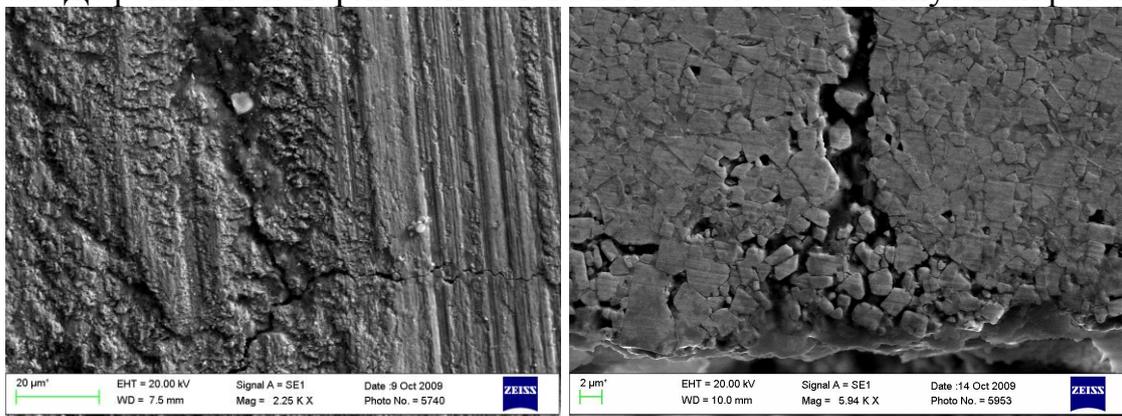
WC и сложного карбида $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$. Свидетельством того, что засаленный слой частично скрывает поверхность алмазного круга, служит и наличие фаз углерода C (алмаза) и элементов входящих в состав связки. Такими фазами являются твердые растворы меди и олова $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$, $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$, $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$, $\text{Cu}_{0,932}\text{Sn}_{0,068}$ и меди Cu.



а) обработанная поверхность, увеличение $\times 4500$

б) шлиф поперечного разреза, увеличение $\times 200$

Рис.5. Дефекты на поверхности сплава ВК8 после 15-ти минут шлифования



а) обработанная поверхность, увеличение $\times 2500$

б) поперечный разрез, увеличение $\times 6000$

Рис.6. Дефекты на поверхности сплава ВК8 после 30-ти минут шлифования

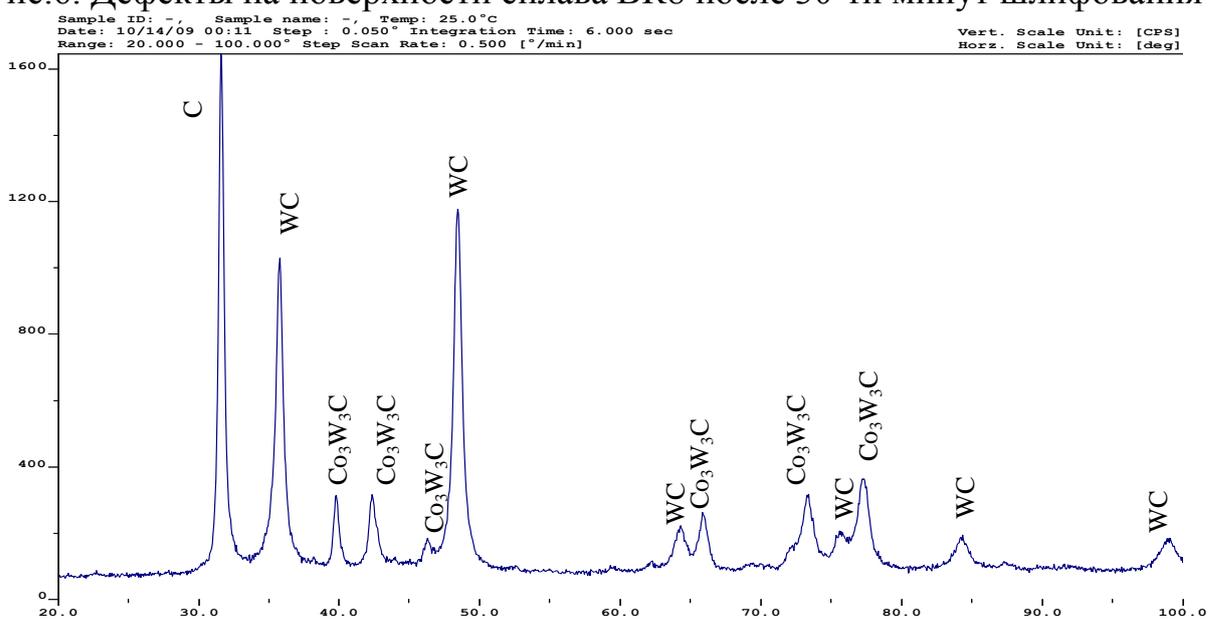


Рис.7. Фазовый состав круга АС6 после 30-ти минут шлифования сплава ВК8
Проведенный спектральный анализ алмазного шлифовального круга АС6 после 30-ти минут шлифования твердого сплава ВК8 показал, что на поверхности образуется

засаленный слой, строение которого определяется наличием вольфрама и кобальта, входящих в состав обрабатываемого материала, а также оксидов и углерода (рис.3).

После 30-ти минут шлифования на рентгенограмме проявились фаза карбида вольфрама WC и фаза сложного карбида вольфрама Co_3W_3C , так называемой фазы η , которая образуется при дефиците углерода и представляет собой двойной карбид вольфрама и кобальта (рис.7). Образование фазы Co_3W_3C может свидетельствовать о деструкции карбида вольфрама WC в поверхностном слое твердого сплава.

Проведенные исследования засаленного слоя и полученные экспериментальные данные, снимки и спектрограммы, а также рентгенограммы с поверхности алмазных кругов на металлической связке, позволяют предположить, что процесс засаливания будет зависеть от структуры и состава связки кругов и обрабатываемого материала.

При исследованиях был спланирован и реализован полный факторный эксперимент типа 2^4 . Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительных поисковых экспериментов. Эксперименты были поставлены по программе центрального композиционного планирования второго порядка. Проверка адекватности по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости показала, что зависимости следует признать адекватными. Обработка данных осуществлялась на компьютерной технике с использованием программ «Microsoft Excel – 2007» и «Mathcad – 2000 Pro».

На основе теории планирования эксперимента и статистической обработки результатов, получены математические зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a , удельного расхода алмазных шлифовальных кругов на металлической связке q , эффективной мощности $N_{эф}$ от режимов обработки при комбинированном электроалмазном шлифовании твердого сплава BK8, зависимости представлены в табл.1.

Таблица 1

Регрессионные зависимости исследуемых параметров при комбинированном электроалмазном шлифовании твердого сплава BK8

Материал	Зависимости	Ед.изм.
BK8	$R_a = -5,61 + 1,71S_{np} + 1,68t + 1,71i_{np} + 1,17i_{np} - 0,21S_{np}^2 - 42,11t^2 - 0,1i_{np}^2 - 4,2i_{np}^2$	мкм
	$q = 0,042 + 0,074S_{np} + 15,5t + 0,03i_{np} + 1,44i_{np} - 0,01S_{np}^2 - 386,6t^2 - 0,002i_{np}^2 - 3,59i_{np}^2$	мм ³ /мм ³
	$N_{эф} = -181089 + 698,61S_{np} + 692468 + 695,28i_{np} + 69299i_{np} - 87,33S_{np}^2 - 173117t^2 - 34,76i_{np}^2 - 173247i_{np}^2$	Вт

Шероховатость обработанной поверхности образцов после шлифования измерялась с помощью профилограф – профилометра «АБРИС – ПМ7». Технические возможности прибора позволяют измерять профиль микронеровностей по нескольким параметрам одновременно: R_a , R_z , R_{max} , S_m , t_p и выполнить автоматический расчет усредненного значения, вывести на монитор или на печать результаты измерений.

Удельный расход алмазноносного слоя оценивался методом соотношения объемов абразивного $V_{a.c.}$ и обрабатываемого $V_{o.m.}$ материалов.

Определение мощности осуществлялось комплектом измерительным, позволяющим фиксировать изменение мощности резания N_p : $N_{эф} = N_p - N_{x.x.}, [Bm]$.

Третья глава посвящена теоретическому обоснованию образования засаленного слоя алмазных шлифовальных кругов на металлической связке основанное на термодинамике поверхностных явлений, протекающих на границе двух фаз. За толщину поверхностного слоя (промежуточной фазы) принято расстояние по обе стороны от границы раздела фаз, за пределами которого свойства слоя перестают отличаться от свойств объемных фаз. Практически вся поверхностная энергия сосредоточена в поверхностном слое толщиной в несколько ангстрем, поэтому связанные с ней процессы можно отнести к поверхностному слою.

В теоретическом плане возможно два подхода к обозначенной проблеме. С одной стороны, используя “метод избыточных величин” можно считать, что все изменения термодинамических параметров в поверхностном слое соотносятся в сравнении с параметрами объемной фазы к разделяющей поверхности, не имеющей объема или толщины. При таком рассмотрении, поверхность характеризуется избыточными термодинамическими параметрами, непосредственно отражающими проявление поверхностной энергии. Объемные фазы считаются однородными вплоть до разделяющей поверхности. В соответствии с “методом избыточных величин” (Рис.8(I)) энергия системы равна сумме энергий G_1 и G_2 объемных фаз 1 и 2 и поверхностной энергии σS , которая является избыточной:

$$G = G_1 + G_2 + \sigma S,$$

где σ – поверхностное натяжение, $H/м$, S – площадь поверхности, $см^2$

При использовании данного метода нет необходимости определять границы поверхностного слоя. Этот метод оперирует поверхностными избытками, что упрощает математические выражения, хотя избыточные параметры зависят от положения разделяющей поверхности. С другой, метод “слоя конечной толщины” – поверхностный слой рассматривается, как имеющий определенные размеры. Его термодинамические параметры включают как поверхностную, так и энергию объема слоя, имеющего те же свойства, что и объемные фазы. При данном методе рассматривается поверхностный слой, имеющий определенные размеры (Рис.8(II)). Его термодинамические параметры включают как поверхностную, так и энергию объема слоя, имеющего те же свойства, что и объемные фазы. При данном методе рассматривается поверхностный слой, имеющий определенные размеры (Рис.8(II)). Его термодинамические параметры включают как поверхностную, так и энергию объема слоя, имеющего те же свойства, что и объемные фазы.

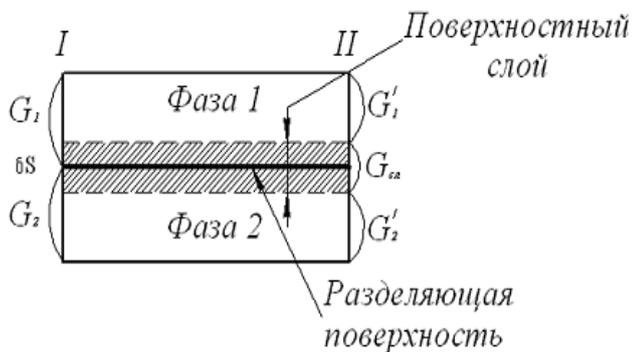


Рис.8. Термодинамические параметры

I – по методу избыточных величин

II – по методу слоя конечной величины

Термодинамические параметры включают как поверхностную энергию σS , так и энергию объема слоя G_{cl}^v , имеющего те же свойства, что и объемные фазы ($G_{cl} = \sigma S + G_{cl}^v$). Границы объемных фаз совпадают с границами поверхностного слоя. Энергия той же системы в методе “слоя конечной толщины” при этом выразится соотношением:

$$G = G_1' + G_2' + G_{cl} = G_1' + G_2' + G_{cl}^v + \sigma S,$$

где G_1' и G_2' – энергия соответственно фазы 1 и фазы 2 до границы поверхностного слоя.

Так как, при микрорезании алмазными зернами обрабатываемого материала в результате адсорбции, происходит перераспределение компонентов между объемными фазами и поверхностным слоем, что влечет за собой изменение химических потенциалов в системе, поэтому этот процесс можно рассматривать как превращение поверхностной энергии в химическую. По аналогии с химическим потенциалом, электрохими-

ческий потенциал заряженных частиц определяется производной от величины свободной электрохимической энергии по числу молей данного элемента.

При шлифовании происходит съем материала в виде мельчайших частиц, которые в свою очередь, являются носителями зарядов. Частицы разных размеров обладают неодинаковыми химическими потенциалами, что создает движущую силу переноса вещества от мелких к более крупным частицам. Этот процесс ведет к исчезновению мелких частиц, уменьшению средней дисперсности (удельной поверхности) и снижению энергии поверхности.

В основе этих взаимодействий лежит соотношение между силами притяжения и отталкивания частиц. Существует единое мнение в отношении природы сил притяжения, которые обусловлены межмолекулярными силами. Силы же отталкивания между частицами могут иметь разную природу, зависящую от дисперсности частиц и вещества.

Описать поведение электронов в обрабатываемом материале и в металлической связке шлифовального круга можно согласно статистике Ферми – Дирака. То есть, если имеется система тел, которая находится в термодинамическом равновесии, то уровни Ферми всех тел системы совпадают. Это равнозначно выравниванию электрохимических потенциалов всех тел. Внешнее поле приводит к такому распределению потенциала, что вне поверхности он падает линейно. Поэтому на поверхности металла получается потенциальный барьер, а из квантовой механики известно, что электрон может проникать (переходить) сквозь такой барьер. Данный подход применим к операции шлифования для объяснения процесса засаливания круга, если в качестве фазы 1 рассматривать шлифовальный круг, фазы 2 – обрабатываемую деталь, а слой засаливания – как поверхностный слой. Очевидно, что процесс засаливания будет зависеть не только от термодинамических параметров, но и от атомно-молекулярных связей, которые формируют структуру взаимодействующих материалов. Поэтому засаленный слой предлагается рассматривать как двойной электрический слой.

Опираясь на теорию образования и строения двойного электрического слоя, представляется возможным выполнить расчет величины засаленного слоя круга.

Рассмотрим металлическую связку круга и обрабатываемый материал как два разнородных металла, сначала разведенных на бесконечно большое расстояние, а затем сближенных на расстояние близкое к параметрам кристаллической решетки. Поверхностный заряд q определяется в соответствии с обозначенной теорией по формуле:

$$q = \frac{\varepsilon_0}{H} \varphi, \quad (1)$$

где ε_0 – постоянная электрическая, Φ/m ; φ – электрический потенциал, B ; H – величина засаленного слоя, mm (mkm).

В выражении (1), $\varphi = \Delta\varphi = -(A_1 - A_2)/e$ – разность потенциалов между двумя контактирующими поверхностями. A – работа выхода электрона. Уровень или энергия Ферми определяет концентрацию свободных электронов в металле. С учетом энергий или уровней Ферми разность потенциалов примет следующий вид:

$$\Delta\varphi = (W_{F_2} - W_{F_1})/e, \quad (2)$$

где W_F – энергия Ферми, $Dж$ (εB), определяемая из выражения (3):

$$W_F = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, Дж·с; m_e – масса электрона, кг.

Таким образом, в выражении (1) q – плотность распределения заряда, определить-ся как:

$$q = e(n_2 - n_1)/S, \quad (4)$$

где S – площадь контакта, мм²; e – заряд электрона, Кл; n_1 и n_2 – количество свободных электронов в обрабатываемом металле и в металлической связке алмазного круга соответственно, которое определяется из выражения:

$$n_0 = \frac{Na}{A'} \cdot \rho, \quad (5)$$

где Na – постоянная Авогадро, моль⁻¹; A' – атомная масса, г/моль; ρ – плотность материала, кг/м³.

По выражению (3) и (5) определяются энергии для обрабатываемого материала и металлической связки алмазного круга и общее число свободных электронов, учитывая процентный состав.

Преобразовав и подставляя значения разности потенциалов $\Delta\varphi$ и поверхностного заряда q в выражение (1), получим выражение для определения величины засаленного слоя:

$$H = \frac{\Phi_2 - W_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{e^2 (n_2 - n_1)}, \quad (6)$$

По выражению (6) просчитана теоретическая величина образовавшегося засаленного слоя на алмазном круге для различных твердых сплавов, равная порядка 30 мкм. Пример расчета величины засаленного слоя представлен в диссертационной работе.

Анализируя и сравнивая полученные экспериментальные данные (рис.4) с данными, представленными в литературе по исследованию контактных процессов шлифования кругами АСВ (АС6) на металлической связке различных твердых сплавов максимальная величина засаленного слоя составляет порядка 30...40 мкм, в зависимости от условий обработки и материала.

Из полученного выражения (6) можно сделать вывод, что величина засаленного слоя зависит от химической активности элементов, входящих в состав металлической связки шлифовального круга и обрабатываемой детали.

Таким образом, для решения проблемы засаливания при шлифовании необходимо создать условия в зоне резания, при которых связка и деталь будут нейтральными. Такими условиями может служить подвод технологической жидкости и периодическая правка шлифовального круга. При комбинированном электроалмазном шлифовании процесс засаливания блокируется (Патент РФ № 2304504), во-первых, за счет интенсивного анодного растворения обрабатываемой поверхности, во-вторых, непрерывной электрохимической правки шлифовального круга. На практике в качестве реализации таких условий может выступать создание новых видов связок для алмазных кругов, химически-нейтральных к обрабатываемой детали.

Четвертая глава посвящена исследованию поверхности алмазных кругов после электрохимической правки и комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов на рентгеновском дифрактометре и растровом электронном микроскопе. Непрерывная правка осуществлялась по запатентованному методу (Патент РФ № 2304504). На рис.9 показана поверхность алмазного круга после электрохимической правки. На фотографиях отчетливо видны выступающие над связкой алмазные зерна.

При данном методе не наблюдается процесса засаливания, а поверхность круга остается развитой. Проведенный спектральный анализ такой поверхности позволил определить наличие только элементов, входящих в состав связки – медь и олово, углерод (алмаз), а также оксиды. Рентгеноструктурный анализ также подтвердил наличие только фаз твердого раствора, состоящих из элементов связки $\text{Cu}_{0.932}\text{Sn}_{0.068}$ и фазы углерода С (алмаза).

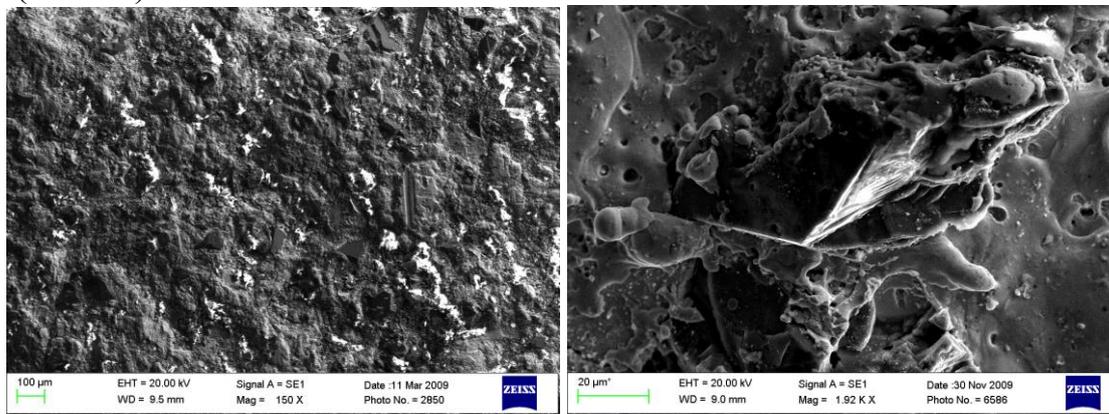
а) увеличение $\times 150$ б) увеличение $\times 2000$

Рис.9. Поверхность круга АС6 после электрохимической правки

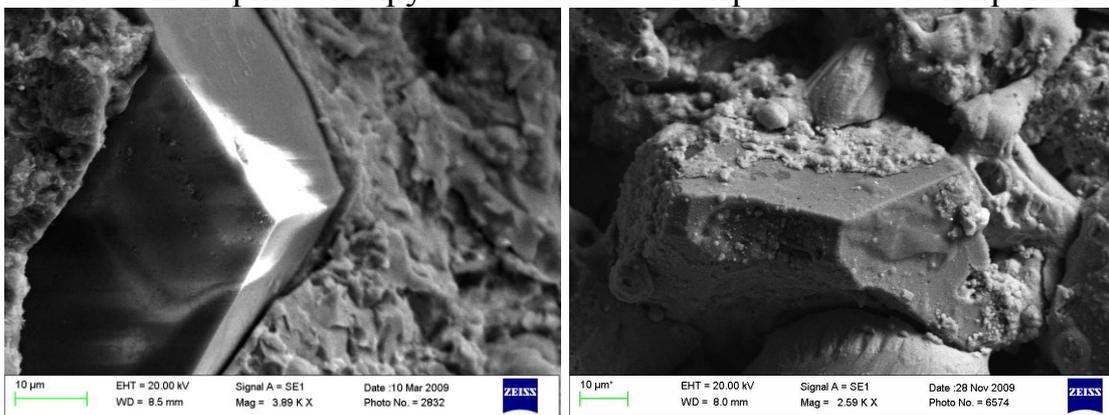
а) увеличение $\times 4000$ б) увеличение $\times 2500$

Рис.10. Поверхность круга АС6 после комбинированного электроалмазного шлифования твердого сплава ВК8

Спектральный анализ образцов алмазного круга АС6 показал, что после 30-ти минут шлифования поверхность круга остается развитой и постоянно обновляется, за счет поддержания режима самозатачивания. Снимки такой поверхности показаны на рис.10. Химический анализ показал, что состав рабочей поверхности алмазного круга состоит из элементов связки с включениями углерода – алмазными зернами.

Анализ спектра, снятого с точки на алмазном зерне, свидетельствует о наличии преимущественно углерода – алмаза и элементов связки, а также незначительного количества кислорода, который образует оксидные пленки. Химический анализ спектра возле алмазного зерна, также показал наличие алмаза и элементов, входящих в состав связки рис.11.

Рентгеноструктурный анализ также подтвердил, что состав алмазного круга формируется из фаз твердого раствора $\text{Cu}_{0.932}\text{Sn}_{0.068}$ и фаз углерода рис.12. Поверхность круга после комбинированного шлифования твердого сплава ВК8 остается идентичной эталону, следовательно, засаливания не происходит и круг работает в режиме постоянного обновления рабочей поверхности.

Таким образом, при комбинированном электроалмазном шлифовании процесс обработки протекает в благоприятных условиях, блокирующих возникновение засаленного слоя, что значительно повышает производительность, качество изделий и экономическую целесообразность данного вида обработки. Качество обработанной поверхности в данном случае в большей степени зависит от плотности анодного тока (тока травления), который и определяет шероховатость поверхности.

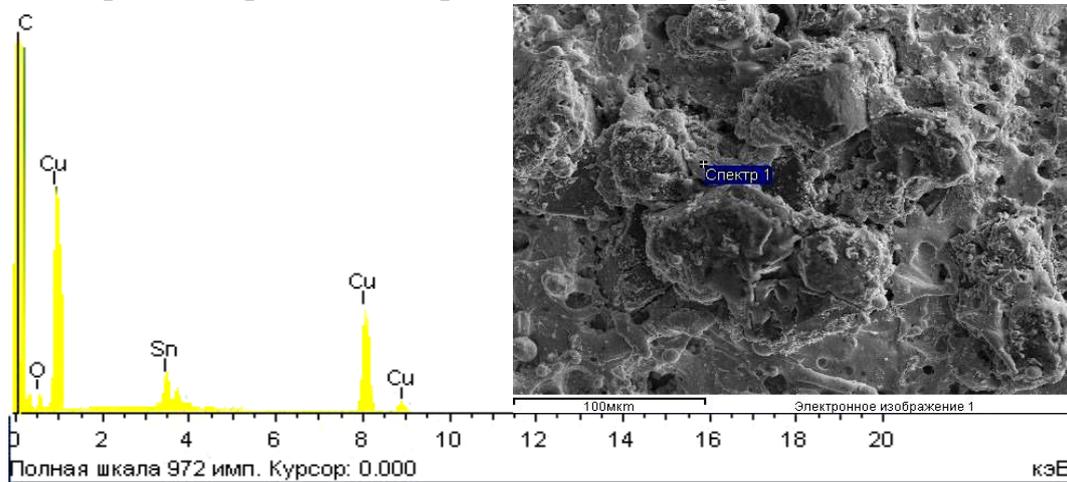


Рис.11. Спектральный анализ поверхности круга после комбинированного электроалмазного шлифования сплава ВК8

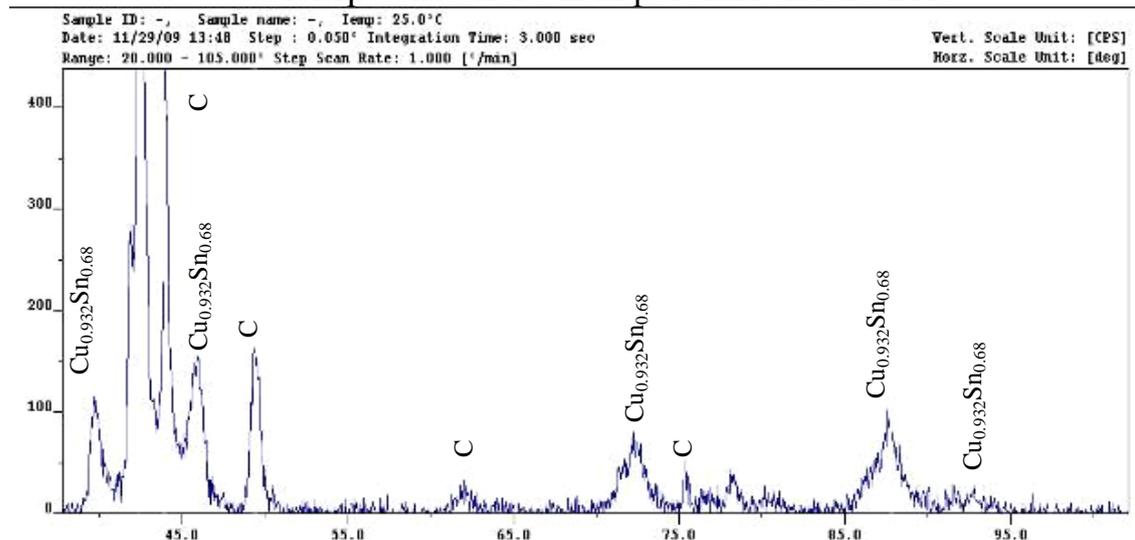
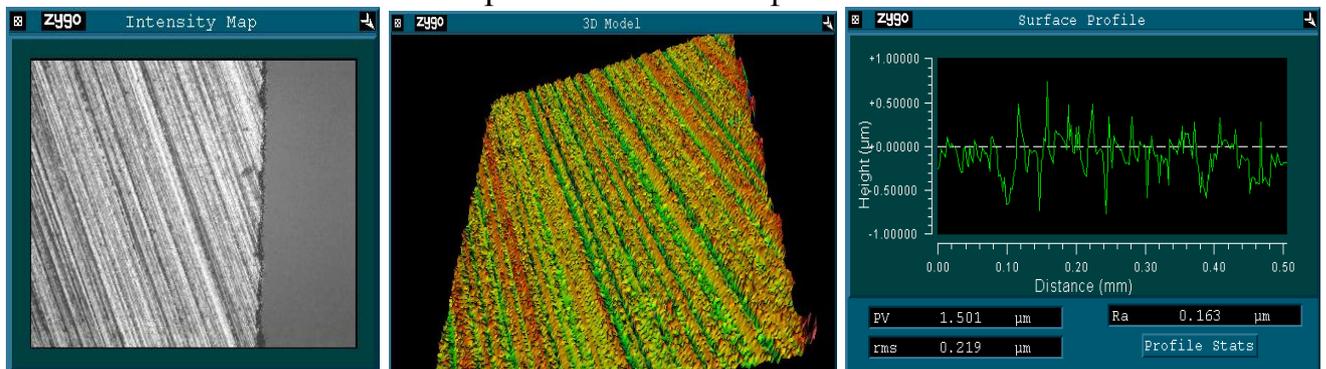


Рис.12. Рентгенограмма круга после комбинированного электроалмазного шлифования

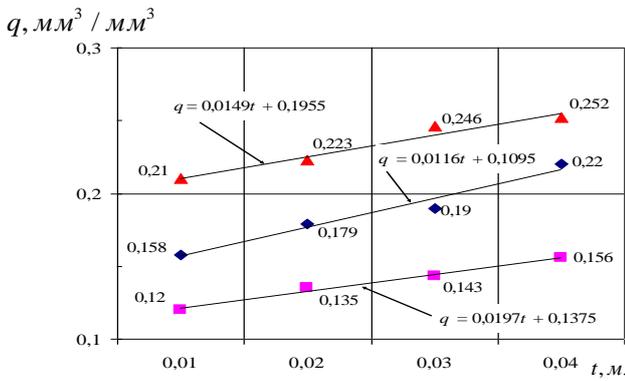


а)

б)

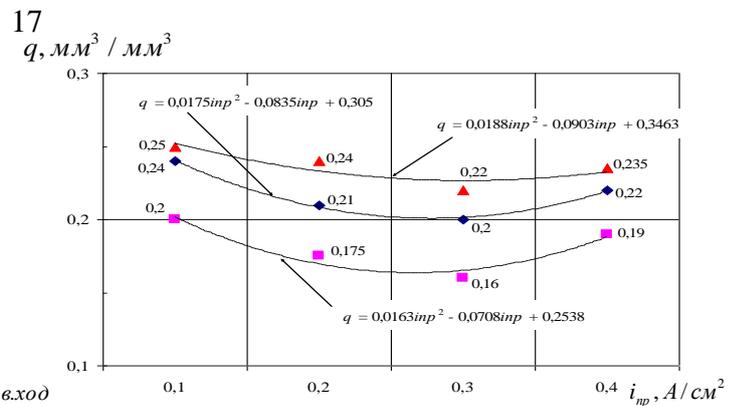
в)

Рис.13. Качество поверхности твердого сплава после комбинированного электроалмазного шлифования



- ◆ $S_{np} = 2 \text{ м/мин}, i_{np} = 5 \text{ А/см}^2, i_{п} = 0,1 \text{ А/см}^2$;
- $S_{np} = 4 \text{ м/мин}, i_{np} = 10 \text{ А/см}^2, i_{п} = 0,2 \text{ А/см}^2$;
- ▲ $S_{np} = 6 \text{ м/мин}, i_{np} = 15 \text{ А/см}^2, i_{п} = 0,3 \text{ А/см}^2$.

а)

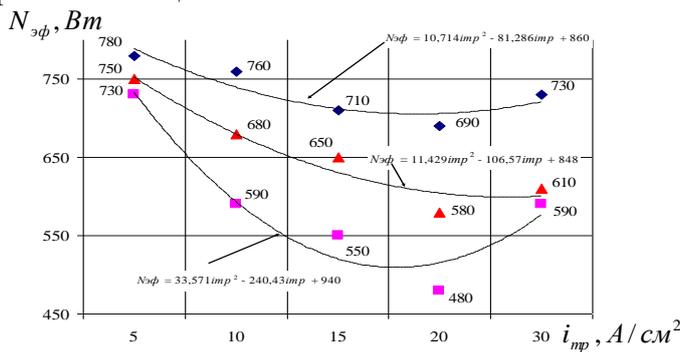


- ◆ $t = 0,01 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 2 \text{ м/мин}, i_{np} = 5 \text{ А/см}^2$;
- $t = 0,02 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 4 \text{ м/мин}, i_{np} = 10 \text{ А/см}^2$;
- ▲ $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 6 \text{ м/мин}, i_{np} = 15 \text{ А/см}^2$.

б)

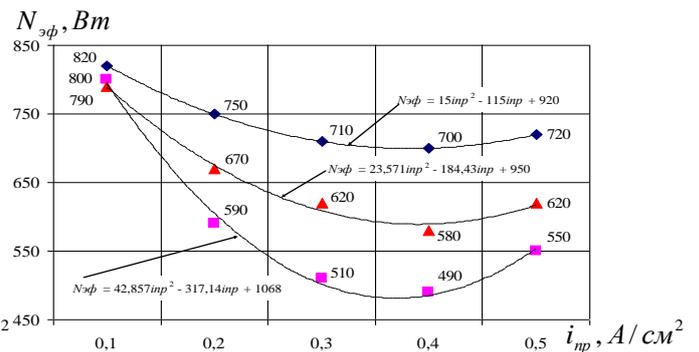
Рис.15. Зависимость удельного расхода шлифовального круга АС6 М2 – 01

Исследования влияния электрических режимов на эффективную мощность показали, что при увеличении плотности тока травления в пределах $i_{np} = 10..20 \text{ А/см}^2$ (рис.16,а) в зоне резания интенсивность протекания электрохимических процессов значительно выше и при этом удаление припуска требует меньших затрат энергии, но это приводит к повышению шероховатости и снижению качества обработанной поверхности в целом.



- ◆ $t = 0,01 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 2 \text{ м/мин}, i_{п} = 0,1 \text{ А/см}^2$;
- $t = 0,02 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 4 \text{ м/мин}, i_{п} = 0,2 \text{ А/см}^2$;
- ▲ $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 6 \text{ м/мин}, i_{п} = 0,3 \text{ А/см}^2$;

а)



- ◆ $t = 0,01 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 2 \text{ м/мин}, i_{np} = 5 \text{ А/см}^2$;
- $t = 0,02 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 4 \text{ м/мин}, i_{np} = 10 \text{ А/см}^2$;
- ▲ $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}, S_{np} = 6 \text{ м/мин}, i_{np} = 15 \text{ А/см}^2$.

б)

Рис.16. Зависимость эффективной мощности шлифования твердого сплава ВК8

Снижение эффективной мощности наблюдается при плотности тока правки равной $i_{np} = 0,25...0,35 \text{ А/см}^2$. При дальнейшем повышении плотности тока правки происходит интенсивное растворение связки, поверхность шлифовального круга постоянно обновляется, т.е. он работает в режиме самозатачивания. В результате, эффективная мощность резания стабилизируется и принимает минимальное значение для соответствующих режимов, но при этом возможен повышенный расход алмазоносного слоя (рис.16,б).

Полученные экспериментальные результаты и данные о шероховатости обработанной поверхности, эффективной мощности шлифования и удельному расходу шлифовального круга хорошо согласуются с исследованиями, представленными в литературе. Однако, уровень шероховатости при комбинированном электроалмазном шлифовании значительно ниже. При данном методе шлифования твердых сплавов группы ВК

процесс засаливания устраняется за счет непрерывной электрохимической правки и выравнивания электрохимических потенциалов контактирующих поверхностей, вследствие чего алмазный круг на металлической связке не теряет своих режущих свойств и работает в режиме самозатачивания во время обработки; удается получать низкую шероховатость обработанной поверхности, чем при обычном алмазном шлифовании при тех же режимах обработки, метод также является экономически эффективным за счет снижения эффективной мощности в 1,5...2 раза и удельного расхода алмазоносного слоя до 30%.

Исходя из условий получения высокого качества обработанной поверхности, устойчивого режима самозатачивания алмазных кругов, при экономически выгодном расходе круга и мощности резания, рациональными для комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов группы ВК следует считать режимы резания: глубина шлифования — $t = 0,01...0,03 \text{ мм/дв.ход}$; продольная подача — $S_{np} = 1,5...3,5 \text{ м/мин}$; плотность тока травления — $i_{np} = 10...15 \text{ А/см}^2$; плотность тока правки — $i_{np} = 0,25...0,35 \text{ А/см}^2$.

В приложении диссертации представлены акты внедрения полученных результатов на предприятиях, в учебный процесс, дипломы и свидетельства, полученные при выполнении работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Процесс шлифования твердых сплавов без СОЖ затруднен, т.к. сопровождается интенсивным засаливанием алмазоносного слоя. В первые минуты шлифования на поверхности алмазного круга возникают локальные очаги образования засаленного слоя частично скрывающего алмазные зерна, который формируются из компонентов обрабатываемого материала и связки. При дальнейшей обработке засаленный слой полностью скрывает алмазные зерна и состоит в основном из элементов обрабатываемого материала и вновь образованных структур с участием внешней среды, что приводит к снижению эффективности обработки и качества обработанной поверхности.

2. Рентгеноструктурный анализ в после 15-ти минут шлифования показал, что засаленный слой состоит из фаз карбида вольфрама WC и сложного карбида $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$. На то, что засаленный слой частично скрывает поверхность алмазного круга, указывает наличие фаз углерода C (алмаза), твердых растворов меди и олова $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$, $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$, $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$, $\text{Cu}_{0,932}\text{Sn}_{0,068}$ и фаза меди Cu, входящих в состав связки. После 30-ти минут шлифования установлены только фазы карбида вольфрама WC и так называемой фазы η , которая образуется при дефиците углерода и представляет собой двойной карбид вольфрама и кобальта. Образование фазы $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ может свидетельствовать о деструкции карбида вольфрама WC в поверхностном слое твердого сплава.

3. Предложен теоретический подход, объясняющий процесс образования засаленного слоя и методика расчета его величины при шлифовании твердого сплава, основанная на классическом представлении образования и строения двойного электрического слоя. Такой подход позволит в дальнейшем выйти на создание перспективных технологических сред и не склонных к засаливанию новых видов связок для алмазных кругов на металлических связках.

4. Получены математические зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a , удельного расхода алмазного шлифовального круга q и эффективной мощности резания $N_{эф}$ от режимов (S_{np} , t , i_{mp} , i_{np}) комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов.

5. Определены рациональные режимы обработки твердого сплава ВК8 при комбинированном электроалмазном шлифовании, позволяющие получить высокое качество поверхности $R_a = 0,09..0,2 \text{ мкм}$, а также добиться снижения эффективной мощности резания в 1,5...2 раза и удельного расхода алмазного круга до 30%.

6. Предложенный и реализованный метод комбинированного электроалмазного шлифования на плоскошлифовальном станке 3Е711, позволяет эффективно использовать алмазный инструмент на металлической связке для обработки изделий из твердых сплавов.

7. Разработан метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления (Патент РФ № 2304504), позволяющий поддерживать развитую поверхность и режим самозатачивания алмазных кругов на металлической связке на протяжении всего периода обработки.

8. Разработанные рекомендации по модернизации плоскошлифовальных станков для реализации метода комбинированного электроалмазного шлифования используются в производстве на оборудовании общего машиностроительного назначения, а также в учебном процессе ГОУ ВПО «Братского государственного университета» по специальности «Технология машиностроения».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях из перечня ВАК России:

1. Янюшкин, А.С. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала [Текст] /А.С. Янюшкин, П.В. Архипов //Технология металлов.–2010.–№ 1.–С. 25–34.

2. Янюшкин, А.С. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов, В.А. Торопов// Вестник машиностроения.– 2009. – № 3. – С. 62 – 69.

3. Патент РФ на изобретение № 2304504, МПК В23Н 53/00, В23Н 3/00. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления /Янюшкин А.С., Сурьев А.А., Якимов С.А., Архипов П.В., и др. - Оpubл. 20.08.2007 Бюл. №23.

Статьи в других изданиях, патенты:

4. Янюшкин, А.С. Исследование работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов и др.// Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 3(7). – С. 87 – 91.

5. Янюшкин, А.С. Механизм образования защитных пленок на поверхности алмазных кругов с металлической связкой [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов и др.// Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 1(5). – С. 132 – 138.

6. Янюшкин, А.С. О механизме разрушения зерен алмаза в процессе электроалмазного шлифования [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов и др.// Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 1. – С. 34 – 36.

7. Янюшкин, А.С. Исследование поверхности безвольфрамового твердого сплава, шлифованного комбинированным методом [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов и др. // Системы. Методы. – 2009. – №2. – С. 69 – 76.

8. Янюшкин А.С. Перспективный метод обработки твердого сплава на плоскошлифовальном станке [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов и др.// Системы. Методы. – 2009. – №4. –С. 71 – 74.

9. Янюшкин, А.С. К вопросу о кристаллическом строении засаленного слоя [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов // Решетневские чтения: материалы XIII Меж-

дунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та имени академика М.Ф. Решетнева (10 – 12 нояб. 2009, г. Красноярск): в 2 ч.; под общ. ред. Ю.Ю. Логинова / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2009. – Ч.1. – С. 362 – 363.

10. Архипов, П.В. О проблеме засаливания при электроалмазном шлифовании [Текст] / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин // Современные проблемы в технологии машиностроения. Материалы всероссийской научно-практической конференции: сборник трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 42 – 45.

11. Архипов, П.В. Особенности режущих свойств алмазных кругов и их влияние на качество деталей машин [Текст] / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Н.П. Петров // Проблемы механики современных машин: Материалы четвертой международной конференции / ВСГТУ. – Улан-Удэ, 2009 – Т.4. – С. 10 – 14.

12. Янюшкин, А.С. Концепции применения электроалмазного шлифования [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов // Решетневские чтения: материалы XII Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (10 – 12 нояб. 2008, г. Красноярск); под общ. ред. И.В. Ковалева / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2008. – С. 247 – 248.

13. Архипов, П.В. О природе засаливания шлифовальных кругов [Текст] / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, С.В. Ковалевский // Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. – В 2 т. – Т.2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ». – 2008. – С. 169 – 174.

14. Архипов, П.В. Достижения и перспективы электроалмазного шлифования [Текст] / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин и др. // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. часть 3 – С. 5 – 9.

15. Янюшкин, А.С. Контактное взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электроалмазном затачивании режущих инструментов [Текст] / А.С. Янюшкин, В.С. Шоркин, П.В. Архипов и др. // Труды Братского государственного университета. Юбилейный выпуск к 50-летию высшего образования в г. Братске. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – С. 86 – 93.

16. Янюшкин, А.С. Определение величины засаленного слоя при комбинированном методе шлифования [Текст] / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов, Е.Д. Лосев // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – С. 135 – 136.

17. Архипов, П.В. К вопросу о совершенствовании и модернизации [Текст] / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин и др. // Механики XXI века. VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – С. 269 – 270.