



МЕДВЕДЕВА ОЛЬГА ИВАНОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ ЗА СЧЕТ БЛОКИРОВАНИЯ
ЗАСАЛЕННОГО СЛОЯ И РАБОТЫ ИХ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ**

Специальность: 05.02.07

«Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2016

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Братский государственный университет»

Научный руководитель: **Янюшкин Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Рахимьянов Харис Магсуманович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология машиностроения", Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск.
Димов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет", г. Омск.

Защита состоится «22» декабря 2016 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201, корпус 3. Факс 8(4217)53-61-50; e-mail: mdsov@knastu.ru .

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» и на официальном сайте по адресу: https://sovnet.knastu.ru/diss_defense/show/63,

Автореферат разослан «___» _____ 2016

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пронин Александр
Иннокентьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В машиностроении выполняется большой объем финишных операций, связанных с изготовлением изделий из высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Достигнуть качественных показателей при шлифовании традиционными методами часто невозможно из-за прочностных свойств изделий из этих материалов. Особенно это важно в инструментальном производстве при изготовлении, восстановлении и эксплуатации твердосплавных режущих инструментов.

Среди основных проблем при обработке твердых сплавов следует назвать потерю режущей способности шлифовальных кругов и склонность их к засаливанию. Частично эти проблемы удается решить за счет применения шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов на органических связках, так как путем подбора рациональных условий и режимов шлифования, возможно добиться режима самозатачивания. Однако эти режимы часто сопровождаются повышенным расходом дорогостоящего шлифовального инструмента. По разным оценкам износ при этом может составлять от 3 до 8 мг/г. Эту проблему можно решить применением шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов на металлических связках. Удельный расход при этом можно сократить до 0,5...1,5 мг/г. Известно, что круги на металлических связках теряют работоспособность практически в первые минуты шлифования по причине засаливания. Поэтому актуальным является изучение механизма образования засаливания и изыскание условий самозатачивания шлифовальных кругов на металлических связках.

Нами предлагается решить обозначенные проблемы за счет применения алмазных кругов на металлических связках, разработки и совершенствования конструкций шлифовальных кругов, а так же комбинированных электроалмазных методов шлифования твердосплавных материалов.

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой «Теоретические основы комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов» при финансовой поддержке гранта Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания по теме № 927 «Разработка теоретических основ контактного взаимодействия при алмазной обработке новых нанопроочненных материалов».

Степень разработанности темы. Эффективности применения кругов из сверхтвердых материалов посвящены работы А.В. Балыкова, Х.М. Рахимянова, В.П. Смоленцева, Ю.В. Димова, Ю.С. Степанова, А.Н. Резникова, Н.И. Веткасова, Г.Г. Винокурова, Г.А. Исхакова, Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучавы, Л.Л. Мишнаевского, В.А. Носенко, В.В. Райта, В.Н. Белякова, А.Ю. Попова, А.С. Янюшкина, В. Lauwers, К.Р. Rajurkar и др. Исследования позволяют утверждать, что шлифование кругами на металлической связке в специальных условиях с использованием электролита при электроалмазном шлифовании повышают эффективность процесса обработки. В частности, применение электрического тока позволяет исключить деформирование обрабатываемой поверхности, снизить силы и температуру в зоне шлифования. Как следствие, исключить или минимизировать фазовые превращения в обрабатываемом материале.

Исследованию процессов засаливания рабочей поверхности шлифовальных кругов посвящены работы А.С. Верещаки, А.А. Кошина, Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучавы, Л.Л. Мишнаевского, Л.В. Худобина, А.П. Бабичева, И.Х. Чеповецкого, А.Н.

Унянина, В.Ю. Попова, А.С. Янюшкина и других исследователей. Основной причиной изнашивания шлифовальных кругов, по мнению многих авторов, является износ алмазных зерен, механическое налипание материала, срезанного с обрабатываемого изделия и, как следствие, забивание межзеренного пространства. Другой взгляд на причину засаливания рассматривается как результат адгезионно-диффузионных явлений между шлифовальным кругом и обрабатываемым материалом.

Способам восстановления рабочей поверхности шлифовального круга посвящены работы С.Г. Белова, Н.В. Азаровой, О.Ф. Еникеева, Л.В. Худобина, В.И. Малышева, Л.Я. Попилова, М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко, Э.Б. Михайлуца, В.Г. Юрьева, А.С. Янюшкина, В. Bhattacharya и других авторов рассмотренных работ. Вопрос правки шлифовальных кругов представляется как способ восстановления рабочей поверхности шлифовального круга. При подводе электрического тока в зону, изолированную от области шлифования, процессы шлифования и правки круга могут быть реализованы одновременно. Это дает возможность более рационально использовать шлифовальное оборудование и алмазные круги. Комбинированное электроалмазное шлифование с одновременной правкой шлифовального круга является наиболее перспективным методом обработки твердого сплава, но требует дальнейшего совершенствования и развития.

Цель работы. Расширение технологических возможностей шлифовальных кругов на металлической связке путем реализации комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой шлифовального круга при обработке твердых сплавов.

Задачи исследования:

1. Исследовать механизм образования засаленного слоя на поверхности алмазных кругов на металлической связке.
2. Провести экспериментальные исследования состава и структуры засаленного слоя на поверхности шлифовального круга на металлической связке при финишной обработке поверхности из твердого сплава.
3. Исследовать работоспособность шлифовальных кругов на металлических связках на основе их режущей способности.
4. Разработать рекомендации по выбору механических и электрических режимов при плоском шлифовании твердых сплавов кругами на металлической связке при комбинированном электроалмазном шлифовании с одновременной электрохимической правкой шлифовального круга.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика исследования засаливания алмазных кругов на металлической связке с учетом механо-физико-химической природы взаимодействия элементов связки круга и обрабатываемого материала, показывающая доминирующие адгезионные связи при различных способах реализации комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой круга.
2. Впервые получены функциональные выражения значений энергии адгезии в зависимости от эффективной мощности резания и режимов шлифования.
3. Научно обоснованы критерии режима самозатачивания в условиях осаждения карбидно-оксидных пленок на поверхности шлифовального круга, обеспечивающих постоянство режущей способности и качество обработанной поверхности.
4. Впервые предложен оценочный параметр достижения условий самозатачивания – минимизация эффективной мощности шлифования, позволяющий обеспечить

работоспособность шлифовального круга и рациональный выбор режимов обработки.

Практическая значимость работы:

1. На основе проведенных исследований даны научно-обоснованные рекомендации для промышленной реализации технологии комбинированного электроалмазного шлифования, гарантирующие высокое качество обработанной поверхности, постоянную мощность резания и режущую способность шлифовального круга.

2. Разработаны практические рекомендации для выбора технологических режимов шлифования при финишной обработке твердых сплавов комбинированным электроалмазным шлифованием с одновременной непрерывной электрохимической правкой шлифовального круга, обеспечивающие работу алмазных кругов на металлической связке в режиме самозатачивания.

Работа имеет важное технико-экономическое значение в области металлообработки, в ней изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, внедрение которых внесет значительный вклад в развитие страны.

На защиту выносятся:

1. Модель образования и развития засаленного слоя на поверхности шлифовального круга в условиях режима самозатачивания.

2. Результаты исследования механизма образования засаленного слоя на рабочей поверхности шлифовальных кругов с металлической связкой при различных схемах шлифования.

3. Результаты исследования влияния эффективной мощности шлифования на адгезию различных пар контактирующих материалов, обеспечивающие устойчивую работоспособность алмазных кругов на металлической связке.

4. Результаты исследования влияния способа шлифования на режущую способность шлифовального круга и шероховатость обработанной поверхности.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены на основе классических законов физики, химии, электрохимии и электрофизики, основ машиностроения с использованием математического аппарата аналитической геометрии и интегрального исчисления.

Экспериментальные исследования выполнены на плоскошлифовальном станке модели 3E711, модернизированном под процессы комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой шлифовального круга. Исследования и обработка результатов проведены с использованием современной техники и компьютерной обработки полученных данных.

Образцы алмазных шлифовальных кругов и обработанные поверхности исследовались с использованием современной аппаратуры: растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 со встроенным химическим анализатором, оптического интерферометра Zygo New View TM 7300.

Степень достоверности и апробация работы. Основные научные положения, выводы, сформулированные в диссертационной работе, апробированы, адекватны и подтверждены в результате экспериментальных исследований. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и конференциях с международным участием: «Современные тенденции в науке: новый взгляд», г. Тамбов, 2011 г.; «Инновации технологии и экономики в машиностроении», г. Томск, 2011 г.; «Жизненный цикл конструкционных материа-

лов (от получения до утилизации)», г. Иркутск, 2011 г.; на итоговой НТК ФГБОУ ВПО «БрГУ» «Естественные и инженерные науки – развитию регионов», г. Братск, 2012 г.; «Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии», г. Алматы, 2013 г.; «Технологическое обеспечение машиностроительных производств», г. Челябинск, 2014 г.; «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 2014 г.; на научном семинаре института авиамашиностроения и транспорта ФГБОУ ВПО «НИ ИрГТУ», г. Иркутск, 2015г.; Научные технологии на современном этапе развития машиностроения, г. Москва, 2016 г., «Механика XXI века», г. Братск, 2012-2016 гг., на научном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск, 2016 г.

Практическая значимость полученных результатов. Практические и теоретические исследования, выполненные в диссертационной работе, используются: при чтении лекционных курсов «Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки», «Прогрессивные методы и технологии обработки металлов»; при проведении практических занятий «Математическое моделирование в машиностроении» в ФГБОУ ВО «Братский государственный университет». Полученные в данной работе результаты внедрены в производство, используются в технологическом процессе подготовки сборного твердосплавного инструмента. Предложенные рекомендации позволили увеличить период стойкости инструмента в 1,5 раза и снизить шероховатость обработанной поверхности в 2 раза, что подтверждает акт о внедрении.

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 27 печатных работ, из них 8 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание степени кандидата технических наук, 3 патента на полезную модель, 1 патент на изобретение. Результаты исследования представлены в коллективной монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 174 наименований и 5 приложений. Работа представлена на 181 странице, содержит 56 рисунков, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цели, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приведен обзор научных работ, посвященных проблемам потери работоспособности шлифовальных кругов, природе изнашивания алмазных кругов при шлифовании твердых сплавов и сверхтвердых материалов, показаны преимущества электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга, рассмотрены основные аспекты, приводящие к износу шлифовального инструмента.

Вторая глава посвящена описанию методики исследований. Эксперименты выполнены на плоскошлифовальном станке модели 3E711, модернизированном под метод комбинированного электроалмазного шлифования с непрерывной правкой круга. При проведении экспериментов задаваемые параметры шлифования изменялись в следующих пределах: плотность электрического тока, подаваемого в область шлифования, плотность тока травления $i_{mp}=10...60$ А/см², плотность тока в области правки $i_{np}=0,1...0,6$ А/см², скорость резания $V=35$ м/с, глубина резания $t=0,01...0,04$ мм и скорость продольной подачи $S=1...4$ м/мин.

Для исследования влияния величин тока травления обрабатываемой поверхности и тока правки шлифовального круга на мощность шлифования применялись алмазные круги на металлических связках: 1А1 АС6 125/100 100 МО16, 1А1 АС6 125/100 100 МО13, 1А1 АС6 125/100 100 МО4. Опытными образцами выбраны твердосплавные пластины различных марок.

Для описания электрохимических явлений необходимо было изучить локально происходящие процессы в зоне резания. Для расчета времени контакта части поверхности шлифовального круга и обрабатываемой поверхности, найдена длина пути, пройденного частью поверхности в процессе шлифования как дуги контакта элемента шлифовального круга и обрабатываемой поверхности:

$$L = \frac{2R}{V} (V + S) \int_0^{\alpha} \sqrt{1 - \frac{4SV}{(V + S)^2} \sin^2 \theta} d\theta, \quad (1)$$

где L - длина дуги, мм; $\alpha = \arccos((R-t)/R)$, рад.; R - радиус шлифовального круга, мм; t - глубина шлифования, мм; S - продольная подача, м/мин; V - скорость круга, м/с.

Скорость движения v_V (мм/с) части поверхности шлифовального круга с учетом времени взаимодействия находится по формуле:

$$v_V = \frac{2(V + S)}{V \arccos \frac{R-t}{R}} \int_0^{\frac{1}{2} \arccos \frac{R-t}{R}} \sqrt{1 - \frac{4SV}{(V + S)^2} \sin^2 \theta} d\theta. \quad (2)$$

Количество анодно-растворенного материала оценено величиной растворенного слоя, снятого с единицы обрабатываемой поверхности. Для определения глубины растворенного вещества получена формула:

$$h = \frac{\eta \cdot \varepsilon_m \cdot i_{mp} \cdot R \cdot \arccos \frac{R-t}{R}}{\rho \cdot V_{кр} \cdot 6000}, \quad (3)$$

где h - толщина растворенного слоя материала, мм; η - выход материала по току; ε_m - весовой электрохимический эквивалент, г/А·мин; i_{mp} - плотность тока травления А/см²; R - радиус шлифовального круга, мм; t - глубина шлифования, мм; ρ - плотность материала, г/см³; V - скорость круга, м/с.

Для оценки влияния величины тока на энергию адгезии использованы результаты экспериментов по установлению режима самозатачивающего круга и по определению критериев оценки его работы при шлифовании различных групп твердых сплавов различными методами. Значение энергии адгезии в зависимости от величины плотности тока при известных значениях эффективной мощности рассчитано по формуле (4), полученной в результате теоретических исследований.

Формула 4 позволяет определить значения энергии адгезии пар взаимодействующих материалов при наличии электрического тока, разупрочняющего поверхность с учетом максимального и минимального значений эффективной мощности при шлифовании, что дает возможность выбора рациональных режимов шлифования алмазными кругами на металлической связке при реализации различных схем комбинированного электроалмазного шлифования.

$$F_a(i) = \begin{cases} 8 \frac{E^{(1)} E^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{E^{(1)} k^{(2)2} + E^{(2)} k^{(1)2}} \cdot \left(1 - \frac{i}{i_0} \left(1 - \frac{N_{\text{э min}}}{N_{\text{э max}}} \right) \right) \cdot 10^{-12}, & 0 \leq i_{np} \leq i_0; \\ 8 \frac{E^{(1)} E^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{E^{(1)} k^{(2)2} + E^{(2)} k^{(1)2}} \cdot \left(\frac{N_{\text{э min}}}{N_{\text{э max}}} \right) \cdot 10^{-12}, & i_{np} \geq i_0. \end{cases} \quad (4)$$

В формуле $N_{\text{э min}}$ обозначено значение эффективной мощности шлифования, при котором реализуются условия самозатачивания шлифовального круга при значении тока правки $i_{np}=i_0$. $N_{\text{э max}}$ - значение эффективной мощности при шлифовании без использования тока правки. Максимальное значение эффективной мощности фиксировалось при полном засаливании рабочей поверхности шлифовального круга.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования, проведенные по методике, представленной во второй главе. Согласно формуле (3) для определения глубины растворенного слоя обрабатываемой поверхности в среде электролита необходимы значения как известных, табличных величин характеристик материала (электрохимический эквивалент, плотность вещества), задаваемые параметры шлифования (радиус шлифовального круга, плотность тока травления, скорость резания), так и величины, полученные только экспериментально (выход по току). Расчеты показали, что увеличение глубины шлифования в четыре раза приводит к росту времени контакта в два раза. Самую высокую скорость при одинаковой продольной подаче обеспечивает $t=0,02$ мм. При этом время контакта элемента круга и обрабатываемой поверхности составляет в зависимости от выбранных режимов от $5 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-5}$ с.

Для определения глубины растворенного слоя получены значения выхода по току для различных твердых сплавов ВК3, Т15К6, ТМ3, ТН20. Они составляют величины порядка 0,5...0,9 в зависимости от плотности электрического тока. При этом увеличение тока в шесть раз дает изменение выхода по току порядка от 22% до 40%. Различия связаны как с химическим составом сплавов, так и с различием электрохимических процессов, происходящих при съеме материала. Вследствие увеличения концентрации электролита и изменения поверхностного слоя обрабатываемого материала, растворение металла приводит к насыщению обрабатываемой поверхности карбидами твердых металлов, что уменьшает способность сплава к электрохимическому растворению.

Для различных режимов шлифования с использованием полученных величин выхода по току получены значения глубины растворенного слоя обрабатываемой поверхности твердых сплавов. Согласно полученным результатам, представленным в тексте диссертации, увеличение глубины шлифования t в два раза (от 0,01 мм до 0,02 мм) приводит к увеличению растворенного слоя h в 1,2 - 1,4 раза, а при увеличении t в 4 раза (от 0,01 до 0,04) приводит к увеличению h в 1,7 - 2 раза в зависимости от величины тока травления. Площадь контакта, от которой зависит эффективность электроалмазного шлифования, является функцией от глубины шлифования: чем больше ее величина, тем большее количество электрического тока будет использовано на электрохимическое растворение. Это естественным образом отразится на количестве материала, снимаемого с обрабатываемой поверхности.

На основании экспериментальных данных предложено оценивать режим самозатачивания по моменту стабилизации и минимизации потребляемой эффективной мощности шлифования $N_{\text{э}}$. При этом значения мощности напрямую зависят от мето-

дов шлифования по причине того, что различные внешние воздействия по-разному влияют на свойства контактирующих поверхностей.

Исследования позволили установить рациональные параметры электроалмазного шлифования (величины плотности тока правки и тока травления), при которых наступает режим стабилизации эффективной мощности, соответствующий режиму самозатачивания. На данном этапе исследовались три метода электроалмазного шлифования: только с электрохимическим травлением обрабатываемой поверхности (ЭХАШ); алмазный с непрерывной электрохимической правкой круга (НЭХП); комбинированный электроалмазный метод с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга (КЭАШ).

Исследования зависимости значения эффективной мощности шлифования N_e от плотности тока травления обрабатываемого материала i_{mp} при электроалмазном шлифовании при $V=35$ м/с, $S_{np}=2$ м/мин, $t=0,02$ мм показали, что стабилизация эффективной мощности наступает при плотности тока травления от 35 до 45 А/см². Анализ зависимости эффективной мощности от тока травления позволил сделать вывод о том, что увеличение плотности тока травления при этом режиме от 10 А/см² до 50 А/см² позволяет уменьшить эффективную мощность в среднем с 700 Вт до 400 Вт.

При работе алмазного круга в режиме с применением только тока правки достигается режим самозатачивания шлифовального круга. Исследования эффективной мощности шлифования N_e при различных значениях плотности тока правки i_{np} свидетельствуют о том, что увеличение плотности тока правки 0,1 до 0,5 А/см² значительно снижает эффективную мощность в 1,7...1,9 раз за счет того, что шлифовальный круг проходит процедуру правки, и шлифование осуществляется алмазными зернами, свободными от продуктов засаливания.

Исследование зависимости эффективной мощности от тока травления при комбинированном электроалмазном шлифовании с одновременной правкой шлифовального круга током плотностью $i_{np}=0,2$ А/см² показало, что эффективная мощность шлифования стабилизируется и уменьшается на 30-50% для кругов с различными связками. Рациональными режимами комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга для обеспечения самозатачиваемости шлифовального круга являются $i_{np}=0,2...0,3$ А/см², $i_{mp}=25...35$ А/см² в зависимости от типа металлической связки алмазного круга (рисунок 1).

По формуле 4 проведены расчеты энергии адгезии для элементов, входящих в металлическую связку алмазного круга для различных методов комбинированного электроалмазного шлифования. Результаты расчетов энергии адгезии для Al, входящего в состав связки алмазных кругов с элементами, входящими в состав обрабатываемых твердых сплавов, приведен на рисунке 2. Расчеты и результаты вычислений энергии адгезии для остальных элементов связки круга приведены в диссертационной работе.

В соответствии с теорией, разрабатываемой проф. А.С. Янюшкиным, пороговое значение, при котором отсутствуют адгезионно-диффузионные взаимодействия между различными материалами, должно быть меньше энергии адгезии F_a для одноименных материалов, без учета внешних воздействий, что примерно соответствует процессу шлифования без правки круга (см. ЭХАШ).

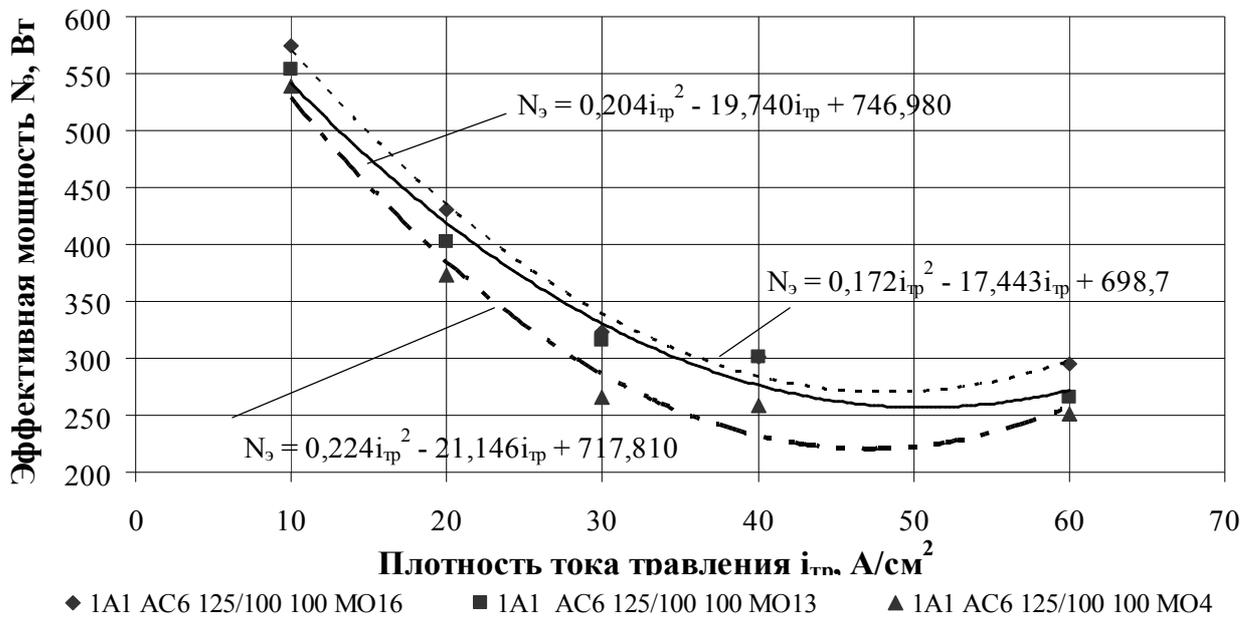


Рисунок 1 - Зависимость эффективной мощности N_e , Вт от плотности тока травления i_{tr} , А/см² при $i_{np}=0,2$ А/см², $V=35$ м/с, $S_{np}=2$ м/мин, $t=0,02$ мм

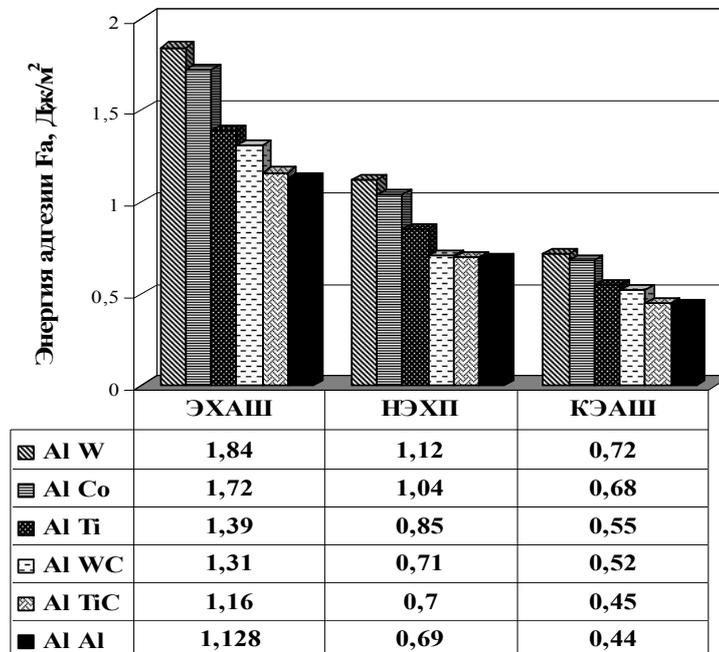


Рисунок 2 - Значения удельной энергии адгезии F_a (Дж/м²) алюминия Al с элементами твердого сплава, обработанного различными методами

Расчеты энергии адгезии показали, что метод электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга обеспечивает условия, при которых отсутствуют физико-химические связи между обрабатываемым и инструментальным материалом. Полученные результаты дают возможность сделать вывод о том, что наличие электрического тока только в области шлифования не оказывает сколько-нибудь значимого влияния на прочность адгезионных соединений и не избавляет процесс шлифования от засаливания. Поэтому осаждение элементов обрабатываемого сплава на поверхности круга происходит за счет того, что растворенные в электролите, они на поверхности круга образуют новые химические соединения, в том числе и окисные пленки.

Энергия адгезии значительно уменьшается при наличии в процессе шлифования тока правки. Это свидетельствует о том, что окисная пленка, предохраняющая

шлифовальный круг от засаливания формируется в области правки алмазного круга электрическим током в среде электролита. Как следствие, исключается сцепление материала, срезанного с обрабатываемой поверхности с металлической связкой и с алмазными зёрнами.

В четвертой главе рассматривается формирование засаленного слоя при различных способах шлифования и механизм образования окисных пленок на поверхности шлифовального круга. На Рисунках с 3 по 6 показана поверхность круга и спектральный анализ состава засаленного слоя на поверхности шлифовального круга после обработки твердого сплава различными способами шлифования. На поверхности круга при шлифовании без использования электрического тока происходит механическое налипание обрабатываемого материала, усугубляющееся высокими температурами в поле высоких напряжений и давлений. Спектральный анализ показал, что слой, образовавшийся на поверхности шлифовального круга, состоит из элементов, принадлежащих обрабатываемому твердому сплаву. Можно отметить, что наибольшую концентрацию в засаленном слое имеют W, Ti и Co, так же обнаружено присутствие углерода, принадлежащего алмазным зёрнам (рисунок 3).

Иная картина наблюдается при использовании электрохимического шлифования. Алмазные зёрна и связка покрыты структурой, отличной от структуры твердого сплава. Это новообразования в виде кристаллов (рисунок 4). Внешне засаленный слой на поверхности шлифовального круга подобен слою, образованному при шлифовании без электрохимического воздействия на обрабатываемую поверхность. Однако химический анализ поверхности круга показывает, что исследуемый слой состоит из элементов как обрабатываемого сплава, так и элементов металлической связки. В состав засаленного слоя входят Sn, Cu, W и Co. Полученные данные подтверждают расчеты, приведенные в главе 3, которые дают возможность сделать вывод о том, что здесь наиболее вероятны адгезионные соединения W, Co и Ti со связкой круга.

Необходимо отметить, что внешние слои связки шлифовального круга, работавшего с непрерывной электрохимической правкой, визуально отличаются от предыдущих образцов и имеют сплошную структуру (рисунок 5).

Процесс электрохимической правки шлифовального круга состоит в том, что материал засаленного слоя, образованного в виде пленки на поверхности круга, вымывается с поверхности при его электрохимическом растворении.

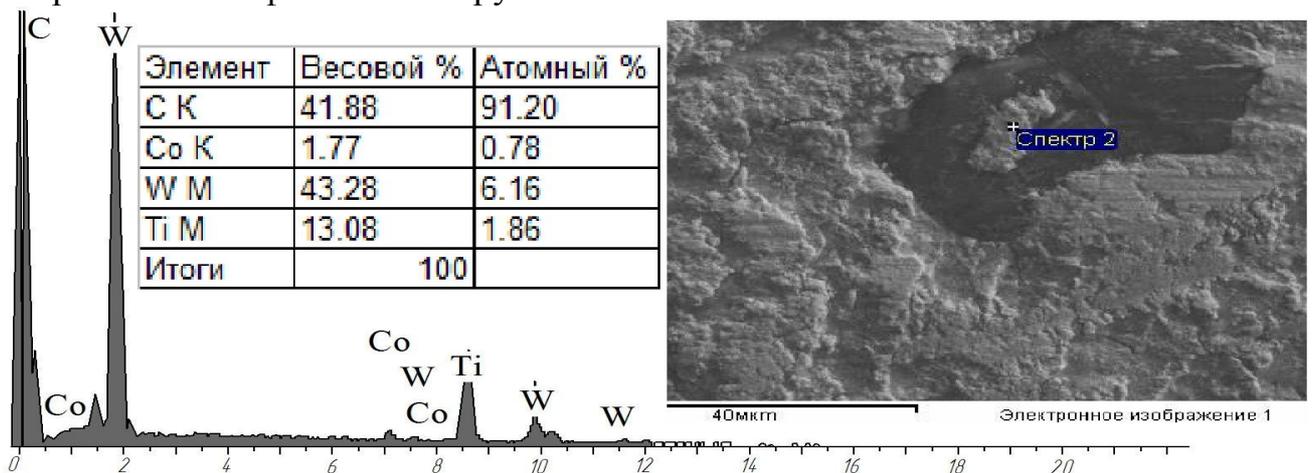
Если в поверхностной пленке, подвергающейся электрохимическому воздействию, на данном этапе шлифования, были трещины, то они являются активными центрами протекающих процессов. Выход металла происходит более интенсивно именно по трещинам как по концентраторам напряжений.

Исследования химического состава вещества в виде пленки имеет состав, сходный с составом связки шлифовального круга. Этот факт позволил сделать вывод о том, что метод шлифования с использованием электрохимической правки круга позволяет исключить осаждение элементов твердого сплава на рабочей поверхности круга и существенно улучшить его режущую способность.

Анализ образца круга, после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой круга показан на рисунке 6.

Рабочая поверхность является развитой, а алмазные зёрна находятся в удовлетворительном состоянии. На поверхности круга наблюдаются мелкие частицы в виде кристаллов. По структуре они отличны от сплошной структуры твердого сплава

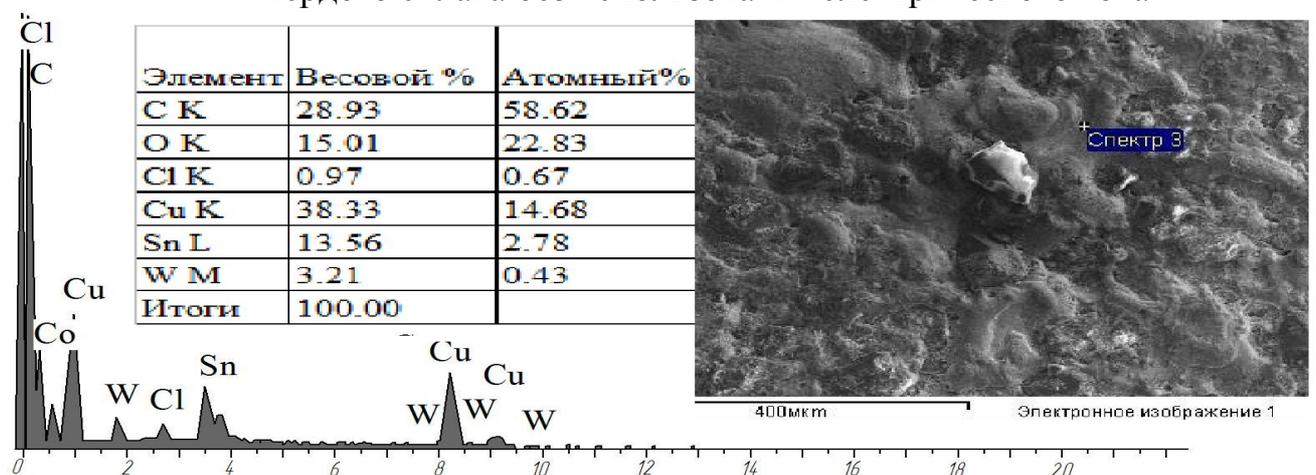
или металлической связки. Предполагаем, что показанные кристаллы являются зародышами новообразований. В дальнейшем они, сливаясь, и образуют пленку на поверхности шлифовального круга.



Полная шкала 972имп. Курсор: 0.000

кэВ

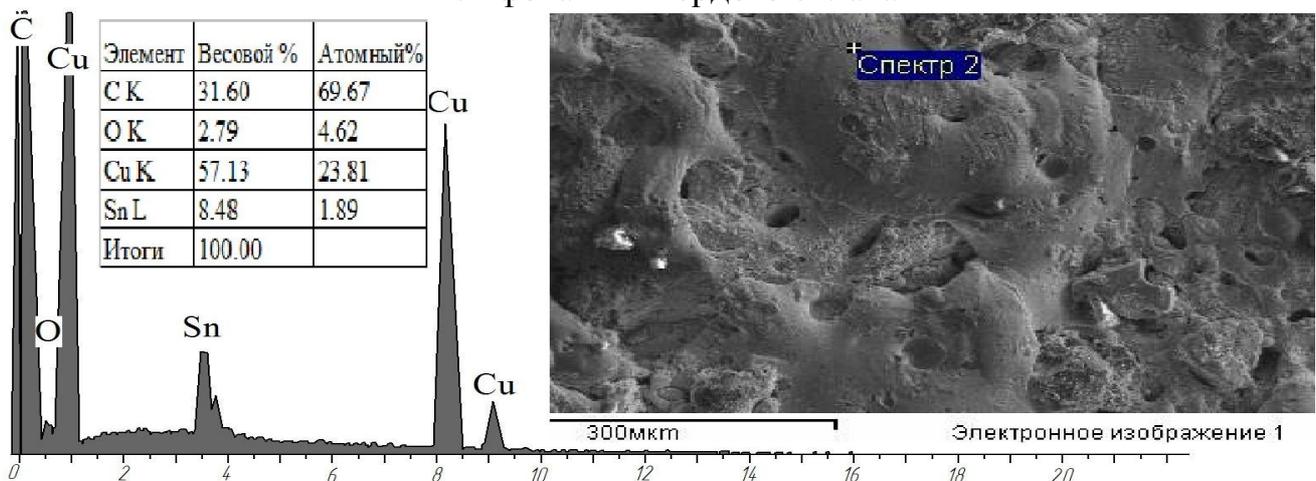
Рисунок 3 - Поверхность шлифовального круга после шлифования твердого сплава без использования электрического тока



Полная шкала 972имп. Курсор: 0.000

кэВ

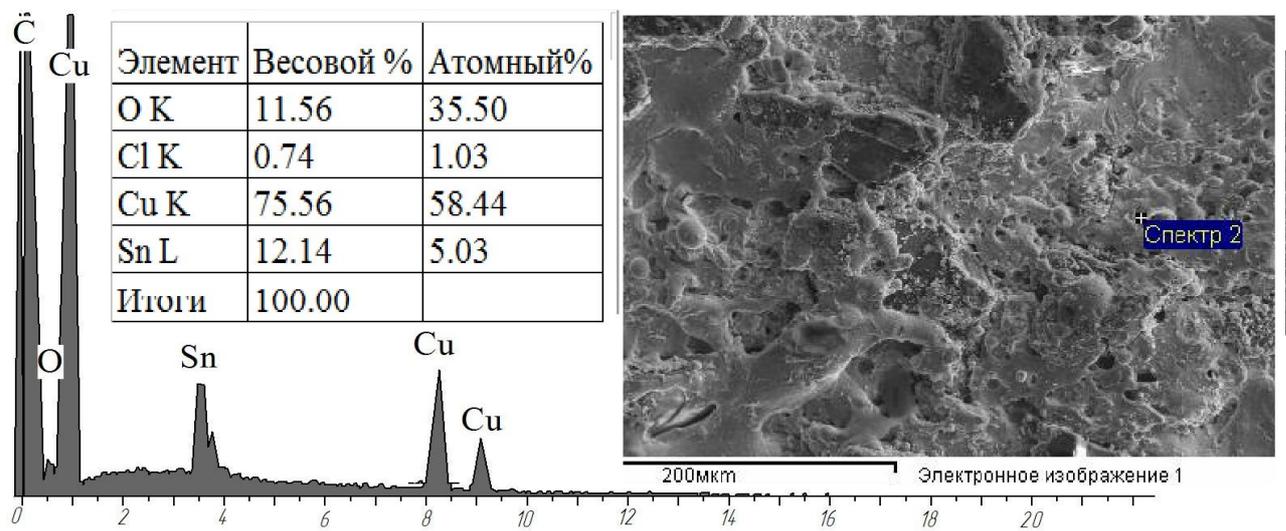
Рисунок 4 - Поверхность шлифовального круга после электрохимического шлифования твердого сплава



Полная шкала 972имп. Курсор: 0.000

кэВ

Рисунок 5 - Поверхность шлифовального круга после алмазного шлифования твердого сплава с непрерывной электрохимической правкой



Полная шкала 972имп. Курсор: 0.000

кэВ

Рисунок 6 - Поверхность шлифовального круга после комбинированного электроалмазного шлифования твердого сплава с непрерывной правкой

В пятой главе приведены результаты исследования режущей способности шлифовального круга на металлической связке при шлифовании твердого сплава. Критерием режущей способности, используется отношение съема материала в единицу времени, отнесенную к радиальной составляющей силы резания:

$$K_p = \frac{Q_M}{P_y}, \quad (5)$$

где Q_M - величина съема материала в единицу времени; P_y - радиальная составляющая силы резания.

Практически измерение P_y требует дополнительного оборудования и оснастки, в отличие от измерения эффективной мощности шлифования N_s . Исходя из этого, нами предлагается критерием оценки работоспособности шлифовального круга использовать приведенный коэффициент режущей способности в виде:

$$K = \frac{Q_M}{N_s} = \frac{S \cdot t \cdot b_z}{N_s}, \quad (6)$$

где K – приведенный коэффициент режущей способности, $\text{мм}^3/(\text{мин} \cdot \text{Вт})$; S – величина продольной подачи, $\text{мм}/\text{мин}$; t – глубина шлифования, мм ; b_z – ширина контакта шлифовального круга и заготовки, мм .

Шлифование твердых сплавов комбинированным электроалмазным способом приводит к тому, что механическое резание алмазными зёрнами дополнительно сопровождается электрохимическим съемом материала обрабатываемой поверхности. Реализация комбинированного электроалмазного шлифования с использованием непрерывной правки круга позволяет снизить N_s с помощью усовершенствования конструкции шлифовального круга. Данное утверждение подтверждается теоретическими положениями и полученными нами патентами РФ.

Режимы комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной правкой шлифовального круга, обеспечивающие стабилизацию эффективной мощности, поддерживают высокую режущую способность шлифовального круга, что необходимо проверить экспериментально. При исследовании спланирован и реализован полный факторный эксперимент типа 2^4 . Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительных экспериментов.

В результате обработки экспериментальных данных получена математическая

модель второго порядка, адекватно описывающая влияние скорости продольной подачи, глубины шлифования, плотностей тока травления и тока правки на режущую способность шлифовального круга $K(S, t, i_{mp}, i_{np})$.

$$K = -6,78514 + 1,91938 S + 192,1800 t + 0,18027 i_{mp} + 4,4459 i_{np} - 0,36898 S^2 - 3041,702624 t^2 - 0,00306 i_{mp}^2 - 0,80645 i_{np}^2$$

В диссертационной работе представлены поверхности отклика при фиксированных механических параметрах $K(i_{mp}, i_{np})$ и электрических параметрах $K(S, t)$. Проведенные дополнительные исследования позволили подтвердить представленные ранее теоретические расчеты по исследованию влияния параметров шлифования на процесс засаливания поверхности шлифовального круга (рисунок 7).

Установлено, что K растет с увеличением плотности тока правки (рисунок 7 а, б). Однако завышенные значения i_{np} приводят к повышенному расходу алмазного круга. Исследования показали, что наибольшие значения K принимает при плотности тока травления i_{mp} от 20 до 30 А/см² (рисунок 7, 8). Увеличение скорости продольной подачи, как и глубины шлифования, приводит к увеличению объема снимаемого материала, что прямо пропорционально режущей способности. Увеличение этих параметров приводит к увеличению, эффективной мощности шлифования, что в свою очередь уменьшает режущую способность шлифовального круга (рисунок 7 в, г).

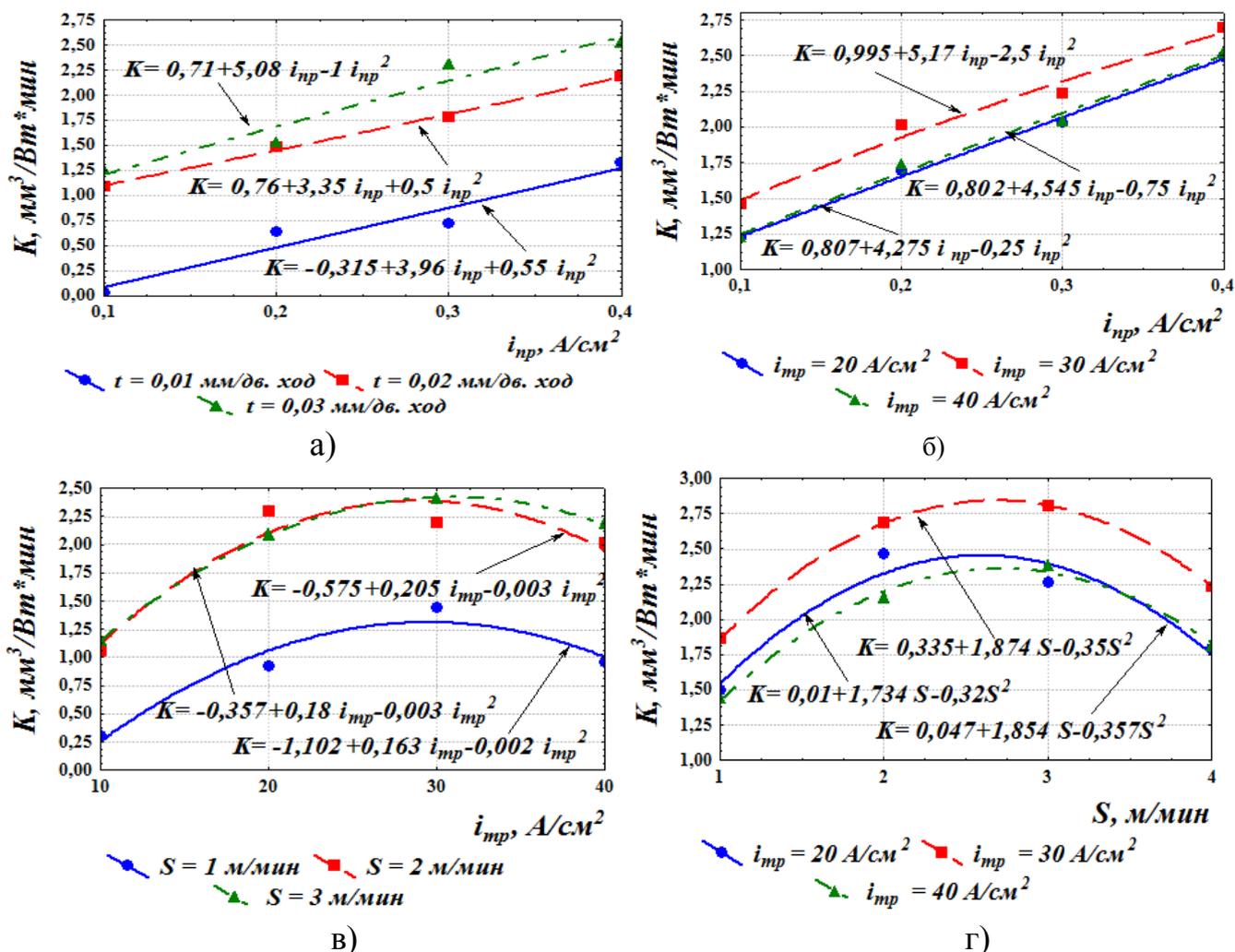


Рисунок 7 – Зависимость режущей способности шлифовального круга

- а) $S=3$ м/мин; $t=0,04$ мм; б) $S=3$ м/мин; $i_{np}=40$ А/см²;
 в) $t=0,04$ мм; $i_{np}=0,3$ А/см²; г) $t=0,02$ мм; $i_{np}=0,03$ А/см²

Проведенные исследования позволили уточнить рациональные режимы комби-

нированного электроалмазного шлифования для обеспечения высокого показателя режущей способности шлифовального круга. Установлено, что наиболее высоких показателей режущей способности K при обработке твердого сплава удается достичь при режимах: глубина шлифования $t=0,02...0,03$ мм; продольная подача $S_{np}=2...3$ м/мин; плотность тока травления $i_{mp}=20...30$ А/см²; плотность тока правки $i_{np}=0,2...0,3$ А/см². Полученные значения рациональных режимов комбинированного электроалмазного шлифования твердого сплава хорошо согласуются с исследованиями эффективной мощности, временем взаимодействия обрабатываемой поверхности и шлифовального круга, глубиной растворения обрабатываемой поверхности.

Для подтверждения качественных параметров обработанной поверхности проведены дополнительные исследования твердосплавных пластин, шлифованных при различных методах комбинированной электроалмазной обработки (шероховатость R_a , наличие макро- и микродефектов, сколов на режущей кромке и др.) на оптическом интерферометре Zygo New View TM 7300 (Германия) и выполнены стойкостные испытания этих пластин.

Установлено, что при обычном алмазном шлифовании возможно образование макро- и микротрещин, разрушение режущей кромки. При других способах электроалмазного шлифования макродефекты отсутствуют. Показано различие шероховатости обработанной поверхности (таблица 1).

Таблица 1 - Шероховатость обработанной поверхности при различных способах шлифования

Способ шлифования	НЭХП	ЭХАШ	КЭАШ
Шероховатость, R_a	0,441	0,233	0,163
Среднеквадратическое отклонение от средней линии r_{ms} , мм	0,654	0,304	0,219

В качестве примера на рисунке 8 показана поверхность твердого сплава Т5К10 после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга.

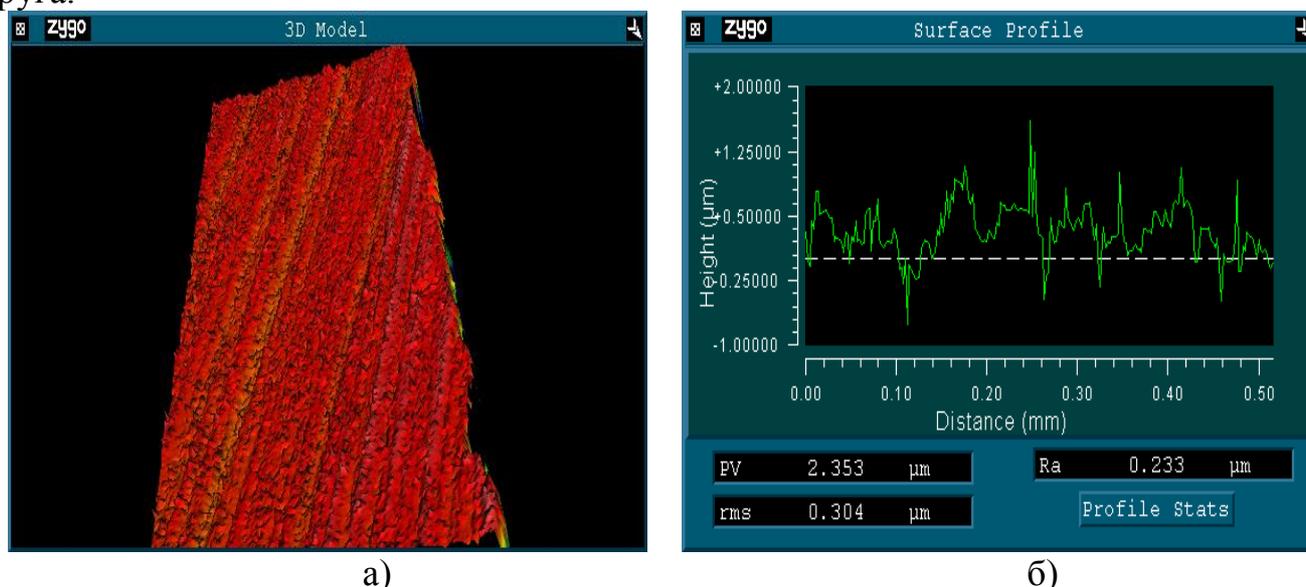


Рисунок 8 - Поверхность твердого сплава, обработанного комбинированным электроалмазным шлифованием а) топографическая модель, б) профилограмма

Таким образом требования ГОСТ 19086-80, дополненный в 2012 году "Пластины сменные многогранные твердосплавные. Технические условия", при котором шероховатость твердосплавной пластины, предназначенной для финишной обработ-

ки должна быть не более $Ra=0,32$ мкм, гарантированно выполняется при шлифовании электроалмазным способом и электроалмазным способом с одновременной электрохимической правкой круга.

Для исследования влияния комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой шлифовального круга на износостойкость режущего инструмента, проведены стойкостные испытания твердосплавных пластин марки Т5К10. Пластины затачивались кругом 1А1 АС6 125/100 М04 на рекомендованных режимах: $V=35$ м/с, $S=3$ м/мин, $t=0,02$ мм, $i_{тр}=25$ А/см², $i_{пр}=0,25$ А/см². Сравнение производилось с пластинами в состоянии поставки, то есть заточенными в заводских условиях. Эксперименты выполнены на станке 1К62 при точении стали 9ХС на режимах $V=70$ м/с, $S=0,07$ мм/об, $t=1$ мм. Опыты повторялись 4 раза. За критерий стойкости режущего инструмента принята величина фаски износа по задней поверхности $h_3=0,4$ мм.

Результаты исследований показали, что износ 0,4 мм, выбранный в качестве критерия стойкости, на пластине в состоянии поставки достигается через 55 минут. Пластина, которую прошлифовали по передней поверхности способом КЭАШ, через такой же срок работы изношена на 0,27 мм. Износ 0,4 мм этой пластины зафиксирован через 80 минут работы. Результаты проведенных испытаний показаны на рисунке 9.

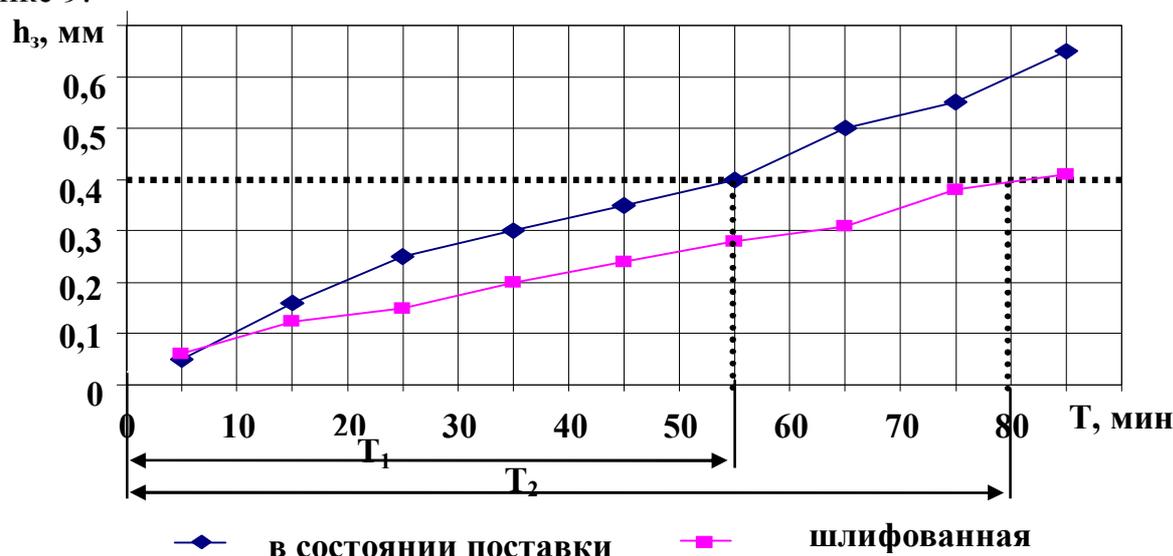


Рисунок 9 - График зависимости износа пластины Т5К10 от времени испытаний

Из представленного графика видно, что период стойкости инструмента, обработанного КЭАШ в 1,45 раза больше по сравнению с инструментом в состоянии поставки (заточенного в заводских условиях).

На основании выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований предложены научно обоснованные решения задачи по устранению засаливания алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердых сплавов и работе их в режиме самозатачивания.

Основные выводы и рекомендации

1. Установлено, что при реализации электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга блокируется рост засаленного слоя на поверхности шлифовального круга и повышается его работоспособность на протяжении всего периода эксплуатации. При комбинированном электроалмазном шлифовании на поверхности шлифовального круга формируется пленка, имеющая карбидную и оксидную природу. При воздействии электрического тока на обрабатываемую поверхность проис-

ходит частичное растворение материала и одновременное осаждение продуктов растворения на поверхности шлифовального круга.

2. Расчетами на основе значений эффективной мощности шлифования, полученной экспериментально, подтверждено, что образующиеся пассивирующие пленки и осажденные соединения углерода снижают энергию адгезии между связкой круга и элементами обрабатываемого материала. Разрушение и деформация пленки обеспечивают ее токопроводность и возможность протекания электрохимических процессов при травлении обрабатываемой поверхности. В зоне шлифования пленка на поверхности шлифовального круга является механическим барьером между рабочей поверхностью круга и обрабатываемым материалом.

3. На основании полученных эмпирических зависимостей выхода по току для сплавов ВК3, Т15К6, ТМ3 и ТН20 установлено, что наиболее благоприятным значением тока травления обрабатываемой поверхности, обеспечивающим удаление части обрабатываемого материала с сохранением структуры сплава, является $i_{np}=20..30$ А/см². Наиболее рациональным значением плотности тока правки, при котором достигается режим самозатачивания, позволяющий повысить экономичность и производительность процесса шлифования, можно считать значение $i_{np}=0,2..0,3$ А/см².

4. Экспериментально установлено, что комбинированное электрохимическое шлифование с одновременной электрохимической правкой круга обеспечивает снижение эффективной мощности в 4 раза по сравнению с шлифованием без использования электрического тока, что позволяет обеспечить повышение производительности процесса и повышение качества обработанной поверхности.

5. Полученные математические зависимости, связывающие эффективную мощность шлифования, время взаимодействия обрабатываемой поверхности и шлифовального круга, глубину растворения обрабатываемой поверхности, позволили выработать рекомендации по выбору механических и электрических режимов шлифования, обеспечивающих высокую режущую способность круга и достаточное (в соответствии с ГОСТ 19086-80) качество обработанной поверхности: скорость резания $V=35$ м/с; глубина шлифования – $t=0,02..0,03$ мм; продольная подача – $S=2..3$ м/мин; плотность тока травления – $i_{np}=25..35$ А/см²; плотность тока правки – $i_{np}=0,25..0,35$ А/см².

6. Исследования показали, что комбинированный метод электроалмазного шлифования с одновременной электрохимической правкой круга при рационально заданных режимах позволяет увеличить период стойкости режущей твердосплавной пластины, обработанной КЭАШ, в 1,45 раза по сравнению с периодом стойкости пластины в состоянии поставки, при критерии затупления $h_3=0,4$ мм.

7. Результаты исследований, полученные при выполнении диссертации, дают возможность выбора рациональных режимов шлифования с учетом свойств материала обрабатываемого инструмента. На основе выполненных исследований возможна модернизация существующего и создание нового оборудования, а так же выбор состава связок алмазных кругов в зависимости от свойств обрабатываемого материала с целью повышения работоспособности шлифовальных кругов на металлической связке и улучшения качественных показателей обработанной поверхности.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Монографии:

1. Эффективные технологии механической обработки деталей из неметаллических материалов. Коллективная монография. / П.В. Архипов, А.В. Балыков, А.А.

Дьяконов, О.Ю. Еренков, В.П. Иванов, Е.Г. Калита, А.Б. Липатова, Д.В. Лобанов, О.И. Медведева, А.В. Морозова, И.В. Шмидт, А.С. Янюшкин, Под ред. А.В. Киричека. - М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 255 с.: ил.

Иностранные издания, входящие в международную базу SCOPUS:

2. Yanyushkin, A.S. Mechanism of protective membrane formation on the surface of metal-bonded diamond disks / A.S. Yanyushkin, O.I. Medvedeva, N.A. Saprykina // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland. – 2014. - Vol. 682. – PP. 327 – 331. (doi:10.4028/www.scientific.net / АММ. 682.327).

Российские издания, рекомендованные ВАК Минобрнауки РФ:

3. Медведева, О.И. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов // Научные технологии в машиностроении - 2014. - № 5 (35). - С. 14 - 19.

4. Медведева, О.И. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя / О.И. Медведева, А.С. / Янюшкин, В.Ю. Попов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2014. - № 3 (64). - С. 68-75.

5. Попов, В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. - 2014. - № 3 (23). - С. 68-74.

6. Янюшкин, А.С. Электроалмазная обработка высокопрочных материалов с нанесением защитных покрытий А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, О.И. Медведева, С.В. Ковалевский, Д.А. Рычков // Системы. Методы. Технологии. - 2013. - № 3 (19). - С. 125-129.

7. Янюшкин, А.С. Применение алмазных кругов на металлической связке для комплексной подготовки металлорежущего инструмента / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов, О.И. Медведева, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, А.А. Сурьев // Системы. Методы. Технологии. - 2013. - № 4 (20). - С. 105-109.

8. Янюшкин, А.С. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.А. Батаев, О.И. Медведева // Системы. Методы. Технологии. - 2010. - №3(7). - С 87-91.

9. Янюшкин, А.С. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, П.В. Архипов, В.Ю. Попов // Системы. Методы. Технологии. - 2010. - №1(5). - С. 132-138.

10. Янюшкин, А.С. О механизме разрушения зерен алмаза в процессе электроалмазного шлифования / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, С.А. Якимов, П.В. Архипов // Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал. - Братск: ГОУВПО "БрГУ", 2009. №1. - С. 34-36.

Патенты РФ:

11. Патент RU 2522503 С2 / МПК В23В24. Устройство для шлифования абразивными кругами / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Н.В. Тюрин, А.Ф. Пылькин, Н.П. Петров, О.И. Медведева. - № 2012147182/02; заявл. 06.11.2012; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

12. Патент RU 145108 U1 / МПК В23. Абразивный круг для электрохимического шлифования с параллельным расположением токопроводящих вставок / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, П.В. Архипов,

А.М. Кузнецов, О.И. Медведева. № 2014105639/02; заявл. 14.02.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.

13. Патент RU 144707 U1 / МПК В23. Абразивный круг для электрохимического шлифования с перпендикулярным расположением токопроводящих вставок / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, П.В. Архипов, А.М. Кузнецов, О.И. Медведева. № 2014105640/02; заявл. 14.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.

14. Патент RU 144708 U1 / МПК В23. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, П.В. Архипов, А.М. Кузнецов, О.И. Медведева. № 2014105641/02; заявл. 14.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.

Другие издания:

15. Yanyshkin, A.S. Elektro-diamond processing of high-strength materials with drawing sheetings / A.S. Yanyshkin, V. Yu Popov, O.I. Medvedeva, S.V. Kovalevski, D.A. Rychkov, S.A. Sidorenkof, A.V. Kolistratova // Механики XXI века. - 2015. - №14 - С. 199-203.

16. Медведева, О.И. Формирование засаленного слоя на поверхности шлифовального круга при электроалмазном шлифовании с одновременной правкой круга / О.И. Медведева, С.А. Янюшкин, Н.П. Петров // Механики XXI века. - 2015. - №14 - С. 158-162.

17. Медведева, О.И. Выбор режима самозатачивания алмазных кругов на металлической связке на основе стабилизации эффективной мощности шлифования // Механики XXI века. - 2014. - № 13. - С. 84-88.

18. Янюшкин, А.С. Методика и результаты исследований удельного расхода алмазов при затачивании инструментов в производственных условиях / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Д.А. Рычков, О.И. Медведева, Г. Алтангэрэл // Механики XXI века. - 2013. - № 12. - С. 94-97.

19. Медведева, О.И. Анализ геометрии контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой деталью при плоском шлифовании / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Механики XXI века. 2013. - № 12. - С. 104-106.

20. Янюшкин, А.С. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, С.А. Янюшкин, В.Ю. Попов // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию Сибири: в 2 т. – Братск: Изд-во БрГУ, 2012. – Т.1. – С. 182-190.

21. Янюшкин, А.С. Эффективность шлифования изделий из высокопрочных композиционных материалов в нефтегазовой отрасли / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, О.И. Медведева // Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии: Тр. Пятой междунар. Науч.-практ. Конф.: (Алматы, 21-22 февр. 2013 г.) в 2-х т. – Алматы: КБТУ, 2013. - Т.2. – С. 292-296.

22. Медведева, О.И. Расчет энергии адгезии с учетом многокомпонентности системы взаимодействия контактирующих поверхностей / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин // Современные тенденции в науке: новый взгляд: сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. Заоч. Науч.-практ. конф. 29 ноября 2011 г.: в 9 частях. Часть 9; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Из-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2011. – С. 92-94.

23. Янюшкин, А.С. Дефекты и напряжения в твердых сплавах при алмазном шлифовании / А.С. Янюшкин, П.В. Архипов О.И. Медведева // Инновации технологии и экономики в машиностроении: Сборник трудов 11 Международной НТК. Томск: Из-во ТПУ, 2011.- С. 299-301

24. Янюшкин, А.С. Влияние состояния поверхности алмазного круга на качество обработки деталей машин / А.С. Янюшкин, Н.П. Петров, О.И. Медведева // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): мат-лы докладов 1 Всерос. С международным участием НТК (Иркутск, 28-29 апреля, 2011 г.) / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – С. 42-46.

25. Янюшкин, А.С. Влияние процесса засаливания на эффективность алмазного шлифования / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Попов // Научно-технические материалы VIII Международной научно-технической конференции 19-21 мая 2016 г. – М.: Технополиграфцентр, 2016. – С. 267-269.

26. Медведева, О.И. Исследование качества поверхности твердого сплава после комбинированного электроалмазного шлифования / О.И. Медведева, С.А. Янюшкин // Механики XXI века. - 2016. - № 15. - С. 189-194.

27. Медведева, О.И. Исследование износостойкости твердосплавного инструмента при обработке стали 9ХС / О.И. Медведева, А.М. Кузнецов, Е.Д. Лосев, Д.В. Балакин // Механики XXI века. - 2016. - № 15. - С. 99-105.

По данным РИНЦ (E-library.ru) на 15.09.2016:

- индекс Хирша Медведевой О.И. – 10

- импакт-фактор журналов, в которых опубликованы статьи – 0,366

Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «БрГУ»

Заказ № . Тираж 100 экз

665709, Братск, ул. Макаренко, 40.