

Агу Коллинз Агу, Узунян М.Д., Руднев А.В.

**ШЛИФОВАНИЕ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ**

Харьков
НТУ «ХПИ»
2018

УДК 621.923
A27

Рецензенти:

А.П. Тарасюк, докт. техн. наук, проф. УИПА, (г. Харьков)
Ф.В. Новиков, докт. техн. наук, проф. ХНЭУ, (г. Харьков)

Публікується по рішенняу ученого совета университета,
протокол № 8 от 2. 11. 2018 г.

У книзі наведені результати досліджень алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів із застосуванням технології мінімального змащування. Показані його ефективність, особливості взаємодії оброблюваного матеріалу з алмазними колами. Викладено практичні рекомендації щодо розробки та впровадження технології шліфування твердих сплавів при використанні твердого мастильного матеріалу.

Книга призначена для інженерно-технічних працівників промислових підприємств, НДІ, а також для студентів машинобудівних спеціальностей вузів.

Агу Коллинз Агу, Узунян М.Д., Руднев А.В.

A27 Шлифование твёрдых сплавов с применением технологии минимальной смазки: монография / Агу Коллинз Агу, М.Д. Узунян, А.В. Руднев – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – 140 с. – Рос. мовою.

ISBN

В книге приведены результаты исследований алмазно-искрового шлифования твёрдых сплавов с применением технологии минимальной смазки. Показаны его эффективность, особенности взаимодействия обрабатываемого материала с алмазными кругами. Изложены практические рекомендации по разработке и внедрению технологии шлифования твёрдых сплавов при использовании твёрдого смазочного материала.

Книга предназначена для инженерно-технических работников промышленных предприятий, НИИ, а также для студентов машиностроительных специальностей вузов.

The book presents the results of research on diamond-spark grinding of hard alloys using the technology of minimum lubrication. Its efficiency is shown, features of interaction of a processed material with diamond circles are described. Practical recommendations on the development and implementation of the technology of grinding hard alloys with the use of a solid lubricant are set out.

The book is intended for engineering and technical workers of industrial enterprises, research institutes, as well as students of engineering specialties of universities.

Ил. 74. Табл. 85. Библиогр. 168 наим.

УДК 621.923

ISBN

© Агу Коллинз Агу,
Узунян М.Д.,
Руднев А.В., 2018

ВВЕДЕНИЕ

Если не высказывать противоположные мнения,
то не из чего выбрать лучшее.

Геродот

Развитие современной техники неразрывно связано с устойчивой тенденцией разработки и применения новых конструкционных материалов, механическая обработка которых является преобладающей при изготовлении изделий. Прогнозы показывают, что объем механической обработки резанием в дальнейшем будет возрастать. Поэтому интенсификация процессов обработки в машиностроении неразрывно связана с технической задачей применения новых технологий и процессов, совершенствования режущих инструментов, обеспечивающих высокое качество изготовления продукции.

Наиболее распространенными и прогрессивными инструментальными материалами, несомненно, являются твёрдые сплавы, но они же относятся и к наиболее труднообрабатываемым. Решение вопроса эффективности обработки резанием этих материалов, совершенствование технологии приобретает большое значение в связи с их широким применением для изготовления металлорежущих, контрольных, измерительных инструментов, деталей штампов, пресс-форм и других изделий в машиностроении.

В настоящее время одним из наиболее прогрессивных процессов обработки различных твёрдых сплавов является алмазное шлифование. Однако обычное алмазное шлифование, например кругами на наиболее износостойких металлических связках, реализовать затруднительно из-за большой напряжённости процесса и, как следствие, повышенного относительного расхода алмазов и низкой производительности. Основной причиной низкой работоспособности алмазных кругов является засаливание их режущей поверхности, быстрая потеря режущей способности; в процессе работы не происходит возобновления режущего рельефа и, как следствие, невозможно достигнуть стабильных условий взаимодействия рабочей поверхности круга и обрабатываемого материала.

Проблема эффективной обработки твёрдых сплавов решалась путём изыскания мер, связанных с необходимостью поддержания режущей способности и обеспечения устойчивых условий шлифования в течение продолжительного времени. Это было достигнуто введением дополнительной энергии в зону резания в виде электрических импульсов. Такой процесс шлифования – алмазно-искровое шлифование (АИШ) – состоит в совмещении резания алмазными зёрнами с действием электрического тока в зоне потенциального контакта металлической связки с твёрдым сплавом [1, 2, 3]. Этот процесс разработан в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» на кафедре «Интегрированные

технологии машиностроения» им. М. Ф. Семко. Поскольку при АИШ контакт связки с обрабатываемым материалом практически исключен, происходит удаление частиц, попадающих в межзёрненное пространство, то режущий рельеф не засаливается и появляется возможность для более полной реализации уникальных режущих свойств алмазных зёрен при внедрении в материал, а значит, и проявления более высокой потенциальной режущей способности алмазных кругов.

Как известно, в процессе АИШ применяют различные смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС); наиболее часто используется 3 %-ный содовый раствор, эмульсии и др. Применение СОТС струйным поливом имеет целый ряд серьезных недостатков, отмеченных в технической литературе [4, 5]. В последнее время получает распространение и в ряде случаев находит применение так называемая техника (технология) минимальной смазки [6]. Однако такая технология, в основном, используется при механической обработке лезвийным инструментом, а в процессах шлифования не применяется. Поэтому в работе проведен комплекс исследований процесса шлифования твёрдых сплавов с применением технологии минимальной смазки, который показал эффективность и целый ряд преимуществ такой технологии. При этом в качестве технологической среды используется твёрдый смазочный материал (ТСМ) в виде сухой смазки.

Глава 1 ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЁРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Либо я найду путь, либо проложу его.
Сидней

Твёрдые сплавы широко применяются для изготовления металлорежущего инструмента, используемого для обработки различных материалов практически во всех промышленно развитых странах. Около 2/3 выпускаемых твёрдых сплавов используется для изготовления режущего инструмента, которым при механической обработке снимается до 70 % всей стружки. Например, в автомобильной промышленности Японии на долю твёрдосплавного инструмента приходится 90 % резцов, 70 % торцевых фрез, 50 % протяжек, 25 % развёрток. В связи с широким применением твёрдых сплавов для изготовления металлорежущего, контрольно-измерительного инструмента, деталей штампов, прессформ и других изделий в машиностроении решение вопроса об их эффективной обработке является важной технической задачей.

В настоящее время одним из наиболее прогрессивных способов обработки твёрдых сплавов является алмазное шлифование. При этом применение алмазных кругов на органических связках вызывает их повышенный износ. Использование значительно более износостойких алмазных кругов на металлических связках при обычном шлифовании приводит к их быстрому засаливанию и потере режущей из-за сглаживания рельефа рабочей поверхности. В результате уникальные режущие свойства синтетических алмазных зёрен не могут быть полностью реализованы.

Анализ существующих способов алмазного шлифования показал, что значительным резервом повышения их эффективности и работоспособности алмазных кругов обладают комбинированные методы обработки. Среди них, одним из наиболее перспективных является способ алмазно-искрового шлифования (АИШ), разработанный в НТУ «ХПИ» [1, 2, 3]. В нём совмещены процесс механического резания алмазными зёрнами с действием электрического тока в зоне обработки, способствующего самозатачиванию режущей поверхности алмазного круга в процессе шлифования. АИШ позволяет использовать для обработки твёрдых сплавов наиболее износостойкие круги на любых металлических связках. Следует отметить, что при АИШ в качестве рабочей среды применяются диэлектрические жидкости или слабые электролиты; в частности, наиболее широко используются 0,5–3,0 %-ные водные растворы соды, эмульсии и др. Однако использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) струйным поливом имеет ряд недостатков, связанных с производственными затратами

(приготовление, хранение, очистка, профилактические меры) и приведенных в технической литературе [4, 5, 6, 77].

В последнее время имеются попытки применения технологии минимальной смазки, которую можно считать альтернативой использования СОТС на многих операциях механической обработки с различной эффективностью (точение, торцевое фрезерование, сверление и др.). Вместе с тем, следует отметить, что применение технологии минимальной смазки при шлифовании вообще не рассматривается, так как считается неэффективным. Поэтому разработка условий и реализация возможностей применения таких технологий, особенно при шлифовании твёрдых сплавов алмазными кругами на металлической связке представляется весьма перспективным направлением.

Учитывая отсутствие сведений по применению АИШ твёрдых сплавов с минимальной сухой твёрдой смазкой, а также важное научное и практическое значение изучения данного вопроса, в данной работе выполнены комплексные исследования этого процесса обработки, которые показали его целесообразность и эффективность.

1.1 Основные тенденции развития и перспективы применения технологии минимальной смазки

Как известно, смазочно-охлаждающие технологические, в основном, в настоящее время применяются в металлообработке в качестве жидких сред поливом. При этом можно отметить, что в технически развитых странах расходы при использовании таких СОТС даже превышают расходы по использованию металлорежущего инструмента. Это связано с неизбежными затратами средств на изготовление СОТС, транспортировку больших объёмов жидкостей, их дальнейшую регенерацию и утилизацию, а последние два фактора и их реализация усложняются тем, что различные типы СОТС (масляные, эмульсионные, водные) требуют специальных различных подходов в этом вопросе. Кроме того, особенно в последнее время, важное значение приобретают экологические аспекты, связанные с использованием СОТС, они могут быть токсичны, вредны для здоровья рабочего (дыхательные пути, кожные покровы и др.). Имеются данные, что, например, в ФРГ около 40 % заболеваний кожи у рабочих-станочников вызвано применением СОТС [7]. С учётом вышесказанного, если позволяют условия обработки резанием, применяется «сухая» обработка. Это связано, в первую очередь, с использованием новых инструментальных материалов на операциях чистовой обработки, таких как двухслойные алмазные пластинки, кубический нитрид бора, различные поликристаллические алмазы, безвольфрамовые твёрдые сплавы, а также традиционные твёрдые сплавы с различными покрытиями. К наиболее приемлемым операциям механической обработки, где целесообразно применение сухого резания, можно отнести тонкое, чистовое точение, чистовое фрезерование торцевыми фрезами.

Применительно к обрабатываемым материалам сухую обработку можно реализовать успешно при обработке деталей из чугунов.

Учитывая естественные недостатки сухого резания, которые будут отмечены ниже, в последнее время находит все большее применение, так называемая, техника минимальной смазки; на многих технологических операциях механической обработки её можно считать альтернативой традиционным методам использования СОТС струйным поливом или другим способом подачи смазки и охлаждения в зону резания. Вместо обильной подачи СОТС смысл техники минимальной смазки состоит в дозированной подаче соответствующих, применительно к конкретным операциям, сред в необходимом количестве для полного использования. Можно отметить, что данная технология, особенно применительно к средам растительного происхождения, успешно реализуется и осваивается за рубежом на ряде предприятий машиностроительного комплекса [6, 78]. В сравнении с полноструйной подачей с расходом СОТС 3...10 л/мин отмеченная технология характеризуется расходом сред от 0,1 до 10 мл/мин, т.е. фактически на несколько порядков меньше. Таким образом, с учётом экологических, технологических, чисто технических и экономических аспектов, следует отметить, что применение техники минимального смазывания является весьма перспективным направлением.


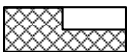
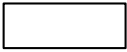

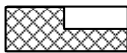

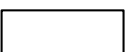

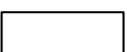


Весьма важно также, чтобы применяемые технологические среды минимальной смазки не содержали вредных компонентов. К ним можно отнести масла растительной природы, твёрдые органические соединения, такие как углеводороды, а также воски, вещества жировой природы, полимерные материалы и т.д. [7]. Все это позволяет отказаться от различных химических добавок, необходимых для СОТС на водной основе, устраняет разбрызгивание, вредные пары, сохраняет чистоту зоны обработки.

В технической литературе имеются рекомендации по соотношению применения сухого резания и обработки с минимальным охлаждением и смазкой для различных инструментальных материалов (табл. 1.1). Как видно из табл. 1.1 сухое резание не эффективно для быстрорежущих инструментальных сталей, которые чаще всего применяются при сверлении, резьбонарезании, где возникает большая вероятность схватывания (адгезии) между инструментальным материалом и обрабатываемой поверхностью изделия.

Кроме того, можно отметить, что полный отказ от применения охлаждающих и смазывающих средств и для других инструментальных материалов может привести к некоторым отрицательным последствиям. К ним можно отнести интенсификацию теплонапряженности процесса из-за увеличения коэффициента трения между обрабатываемым и инструментальным материалом, что с одной стороны может вызвать определённые изменения в поверхностном слое детали, с другой –

повышение износа режущего инструмента. В свою очередь отмеченное будет влиять на точность обработки и шероховатость поверхности.

Таблица 1.1 – Относительное соотношение эффективности применения сухой обработки и минимального охлаждения

Инструментальный материал	Минимальное охлаждение и смазка	Сухая обработка
Инструментальная сталь		—
Быстрорежущая сталь		
Твёрдые сплавы		
Минералокерамика	—	
Кубический нитрид бора		
Поликристаллические алмазы		
		













Поскольку наши исследования посвящены процессу шлифования, представляет определенный интерес рассмотреть применение и сравнение сухой обработки и средств минимальной смазки и охлаждения для различных видов механической обработки, имеющиеся в литературных источниках (табл. 1.2).

Анализ приведенных данных показывает, что при механической обработке на операциях точения, торцевого фрезерования, сверления и некоторых других технология минимального применения смазки также как и сухая обработка применяется с различными соотношениями эффективности.

Что касается вопросов обработки шлифованием, то по имеющейся информации применение минимальной смазки и охлаждения не эффективно, а сухая обработка вообще не рассматривалась.

Поэтому минимизация применения сухой смазки, особенно в таком технологическом процессе как шлифование, представляется важной производственной задачей. Более того, учитывая, что рассматриваются вопросы шлифования твёрдых сплавов алмазными кругами на износостойкой и склонной к засаливанию металлической связке, поставленная задача представляется весьма актуальной.

Таблица 1.2 – Соотношение эффективности применения минимальной смазки и сухой обработки

Вид механической обработки	Минимальное охлаждение и смазка	Сухая обработка
Точение		
Торцевое фрезерование	—	
Профильное фрезерование		
Сверление		
Резьбонарезание		
Шлифование		
 – эффективно		 – неэффективно

Как известно, шлифование труднообрабатываемых материалов кругами на металлических связках целесообразно производить с введением дополнительной энергии в зону резания в виде электрических импульсов с применением в качестве рабочей среды диэлектрической жидкости. Такой процесс шлифования – алмазно-искровое шлифование (АИШ) заключается в совмещении резания алмазными зёрнами с воздействием электрического тока в зоне контакта металлической связки с обрабатываемой поверхностью твёрдого сплава.

Сущность процесса, разработанного в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» [2], состоит в том, что эрозионные разряды способствуют удалению частиц шлифуемого материала, которые засаливают круг, попадая в межзёрненное пространство; в результате обеспечивается самозатачивание режущей поверхности алмазных кругов и сохранение на протяжении длительного периода их работоспособности на высоком уровне.

Если рассматривать процесс АИШ железоуглеродистых материалов, то следует заметить, что по первоначальному замыслу авторов процесса, воздействие эрозионных разрядов на обрабатываемый материал при прямой полярности способствует облегчению его съёма за счёт предразрушения поверхностного слоя, который является анодом [8].

При обработке твёрдых сплавов такое действие эрозионных разрядов нежелательно, так как предразрушение гетерофазных материалов может

способствовать образованию дефектов в виде макротрещин на обработанной поверхности, а также микротрещин между фазами, которые имеют различные коэффициенты линейного теплового расширения. Поэтому АИШ твёрдых сплавов производится с обратной полярностью; при этом действие эрозионных разрядов, в основном, направлено на рабочую поверхность алмазного круга (круг-анод), и они способствуют более активному его самозатачиванию, а постоянно вскрытые алмазные зёрна обеспечивают высокий уровень режущей способности кругов при механическом воздействии на поверхностный слой твёрдого сплава [3, 9].

В процессе АИШ в качестве наиболее распространённой рабочей среды используется 0,5...3 %-ные водные растворы соды; в отличие от электрохимического шлифования уменьшается загрязненность жидкой СОТС, устраняется коррозия различных элементов оборудования, снижается удельный расход алмазов, режущая поверхность алмазного круга приобретает устойчивый характер, что способствует повышению его общей работоспособности.

Интенсификация процесса алмазно-искрового шлифования осуществляется за счёт образования в зоне резания искровых электрических разрядов, оказывающих воздействие на обрабатываемый материал и на рабочую поверхность алмазного круга на токопроводящей связке, что способствует сохранению высокой режущей способности круга и устойчивости рельефа. Устранение засаливания и стабилизация высоких показателей работоспособности кругов является одним из важнейших преимуществ АИШ перед другими способами шлифования.

Несмотря на отмеченные преимущества АИШ с водной средой, одним из существенных недостатков этого процесса всё же следует считать использование СОТС струйным поливом. Не останавливаясь на значительных производственных затратах, связанных с использованием СОТС, таких как очистка, хранение, приготовление, регенерация, профилактические меры и др., подробно и убедительно представленных в технической литературе [10], отметили ряд недостатков и неудобств, вызванных непосредственным использованием СОТС на станках в процессе шлифования. К ним можно отнести следующее: применение многопозиционных приспособлений, шлифование и заточка многолезвийных инструментов, зона обработки практически закрыта, вывод изделий из зоны контакта приводит к разбрызгиванию СОТС и др.

В связи с этим, представляется возможным и актуальным поиск альтернативных способов применения смазывающих средств в виде сухих относительно твёрдых смазок с использованием принципа подачи их в необходимом количестве вместо полива зачастую неуправляемым расходом жидкостей. Такая технология получила название техники минимального смазывания (ТМС) [6, 79, 80].

В качестве такого альтернативного способа с использованием принципа подачи сухой смазки в необходимом количестве вместо полива предложено применение твёрдых смазочных материалов (ТСМ) различных модификаций (углеводородных и карбоксильных). Используемая сухая смазка является хорошей диэлектрической средой, способствует инициированию электрических разрядов и обеспечению устойчивого режущего рельефа рабочей поверхности алмазных кругов и достижению стабильных условий его взаимодействия с обрабатываемым материалом. Столбик из подобранной определенной смеси различных ТСМ необходимого сечения с помощью простого устройства с небольшим усилием (5...10 г) прижимается и постоянно контактирует с рабочей поверхностью алмазного круга.

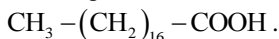
Для выбора оптимального варианта смеси различных углеводов с позиций каплепадения использовались стеариновая кислота (стеарин) и себациновая кислота, имеющая наибольшую из перечисленных средств температуру каплепадения $T = 134 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обоснование соотношения различных твёрдых смазочных материалов (ТСМ) и выявление оптимального состава будет показано ниже. Здесь же отметим следующее. Улучшение обрабатываемости шлифуемых материалов, т.е. облегчение деформации, съёма и образование новых поверхностей является результатом снижения свободной поверхностной энергии твёрдого тела. Это происходит в результате адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ). Собственно адсорбция может быть как физической так и химической. Известно, что физическая адсорбция возникает при взаимодействии электромагнитных полей между атомами и молекулами ТСМ и обрабатываемым материалом, а при химической адсорбции хемосорбционные пленки возникают и закрепляются на поверхности тела химическими связями; при этом известно, что химические связи значительно прочнее физических. С позиций адсорбционной активности и прочности связей с металлическими поверхностями поверхностно-активные вещества по составу располагаются в таком порядке – сложные эфиры, спирты и в наибольшей степени карбоновые кислоты. В дальнейшем это обстоятельство будет учитываться при установлении оптимального состава ТСМ. Смазывающее действие ТСМ способствует более благоприятным условиям физико-механического воздействия обрабатываемого материала и рабочей поверхности алмазного круга. Наиболее характерная граничная смазка обеспечивается образующейся плёнкой в результате химического взаимодействия высших жирных кислот с ювенильными поверхностями шлифуемого материала. Такие поверхности образуются при массовом микрорезании – царапании алмазными зёрнами режущей поверхности круга. Известно, что высшие жирные кислоты обладают высокой смазочной способностью. Следует заметить, что термин «жирные кислоты» предназначен для монокарбоновых кислот, которые получают гидролизом

натуральных жиров. Наименование «высшие жирные кислоты» относится к жирным кислотам с длиной цепи более десяти углеродных атомов.

Карбоновыми кислотами называют органические вещества, молекулы которых содержат одну или несколько карбоксильных групп COOH . В зависимости от количества карбоксильных групп в молекуле кислоты могут быть одноосновными, двухосновными и т.д. Они подразделяются на предельные (насыщенные), непредельные (ненасыщенные), циклические и т.д.

Схематически монокарбоновые кислоты представляют общей формулой RCOOH , из которой следует, что их молекулы состоят из двух разных по составу, структуре и свойствам частей. Одна из них представляет собой карбоксильную группу, а вторая R – углеводородный радикал. Структуру молекулы насыщенной монокарбоновой кислоты, например стеариновой, можно представить следующим образом:

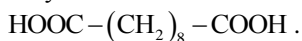


Все высшие жирные кислоты (предельные и непредельные) являются поверхностно-активными веществами. Наличие карбоксильной группы обуславливает полярность их молекул.

В качестве основы твёрдых смазочных материалов (ТСМ), которая определяет их основные функциональные и эксплуатационные свойства, используют различные виды твёрдых веществ, в том числе твёрдые органические вещества, такие как твёрдые жиры, жирные кислоты и их мыла, воски, парафины, церезины и др. Наиболее широко ТСМ применяют в виде карандашей, брикетов и брусков.

Для наших условий алмазного шлифования одним из компонентов для использования в технологии минимальной смазочной среды был выбран технический стеарин, в котором содержатся твёрдые насыщенные жирные кислоты.

Поскольку температура плавления стеарина находится в пределах $49...52^\circ\text{C}$, то для повышения общей температуры каплепадения и регулирования свойств при формировании столбиков смеси использовали себациновую кислоту, температура плавления которой составляет 134°C . Себациновая кислота хорошо совмещается со стеариновой кислотой при сплавлении. Она является полифункциональным кислородосодержащим соединением (ПФКС) и представляет собой двухосновную кислоту со следующей структурой молекулы:



Такие компоненты в составе ТСМ активируют процессы диспергирования, способствуют улучшению обрабатываемости материалов.

Используя различные варианты соотношения сплавляемых компонентов (стеариновая и себациновая кислоты), можно подобрать состав ТСМ, наиболее приемлемый для условий алмазно-искрового шлифования. Важно

также отметить, что подобные составы ТСМ несомненно должны являться экологически безопасными средствами. Следует отметить и такое важное обстоятельство. Создание новых СОТС и ТСМ, способов подачи в зону резания должны обосновываться экономической целесообразностью, удобством применения и общей технологичностью процесса. Остановимся на некоторых особенностях, связанных с применением сухих твёрдых смазок в рассматриваемом нами процессе алмазно-искрового шлифования.

Проблема эффективной смазки и подачи ТСМ в зону взаимодействия поверхностей инструмента и детали является одной из важнейших. Это связано с особенностями процесса механической обработки, где условия контакта дискретны, в отличие от контакта соприкасающихся поверхностей деталей машин; при этом дискретность, прерывистость контактного взаимодействия особенно характерны для процессов шлифования.

Необходимо, чтобы в процессе обработки возникала, создавалась и проникала во все области контактирования «границная плёнка–смазка». При обычных процессах резания лезвийным инструментом механизм проникновения технологических средств на контактные поверхности затруднен, ограничивается непрерывным сходом и движением стружки, проникновением вершин режущего клина в обрабатываемый материал.

При шлифовании твёрдый смазочный материал, контактируя до зоны обработки с развитой при АИШ режущей поверхностью круга, попадает, размещается и сохраняется в межзёрненном пространстве рельефа, постоянно образуя граничный слой (плёнку). В процессе шлифования он экранирует и предотвращает непосредственный контакт металлической связки алмазного круга и обрабатываемого материала. Кроме того, при АИШ отпадает необходимость в таком немаловажном свойстве традиционных СОТС как моющая, очищающая функция; продукты шлифования подвержены эрозионному воздействию и при высоких температурах, возникающих локально в каналах разряда, испаряются.

По нашему мнению, следует также обратить внимание на то, что охлаждающая функция СОТС, как одна из важнейших при обычных традиционных процессах обработки резанием, в процессе шлифования с вводом дополнительной энергии в зону обработки, не имеет большого значения, несмотря на то, что применяются шлифовальные круги на металлической связке. Как известно, в обычных процессах шлифования, в том числе и алмазными кругами, связка играет самостоятельную роль, оказывая большое влияние на физико-механические условия взаимодействия рабочей поверхности круга и шлифуемого материала [14].

В процессе АИШ с обратной полярностью трение связки с обрабатываемой поверхностью практически исключается, а взаимодействие алмазных зёрен с обрабатываемым твёрдым сплавом не вызывает развития высокого уровня температур и их контактные значения весьма низкие. Такие источники тепла как трение, схватывание (адгезия) с применением ТСМ

практически нивелируются в рассматриваемом процессе. Подобные обстоятельства отмечались ранее и присущи разным процессам механической обработки [12].

1.2 Общие условия проведения исследований

Специальные методики исследований и конкретные условия проводимых экспериментов приводятся и описываются ниже. Здесь же остановимся на общих подходах и исходных данных, связанных с содержанием работы.

Поскольку процесс шлифования с применением технологии минимальной смазки с помощью ТСМ, как отмечается в ряде источников, не исследован, а «сухое» резание (шлифование) считается неэффективным [6, 13], нами проводились комплексные исследования различных аспектов рассматриваемого процесса. Исследовались: обрабатываемость твёрдых сплавов, работоспособность алмазных кругов при алмазно-искровом шлифовании, особенности износа алмазных кругов и зёрен, качество поверхности и поверхностного слоя обрабатываемого твёрдого сплава; оценивалась износостойкость режущих инструментов после шлифования по предлагаемой технологии с применением ТСМ при механической обработке точением.

Работоспособность алмазных кругов исследовалась по упругой схеме шлифования, позволяющей наиболее достоверно оценить их потенциальные возможности. В качестве критериев оценивались производительность – Q , мм³/мин, относительный расход алмазов – q , мг/г, удельная себестоимость шлифования – $C_{ш}$, коп/см³.

Качество поверхности определялась по оценке шероховатости поверхности по критерию R_a , мкм и физического состояния поверхностного слоя. Измерение шероховатости производилось с помощью профилографа-профилометра, а фазовый состав и остаточные напряжения в поверхностном слое твёрдого сплава определялись рентгенографическим способом многократных наклонных съёмок ($\sin^2 \psi$ -метод) [14].

Стойкость твёрдосплавных режущих пластин изучалась при точении стали ХВГ по длине пути резания L , м, до определенного критерия затупления по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм. Оценка длины пути резания после различных условий шлифования пластин позволяет выявить соотношения и взаимосвязь стойкости инструмента и состояния поверхностного слоя. Кроме того, анализ износостойкости и длины пути резания даёт возможность установить себестоимость механической обработки точением. Поэтому в качестве обобщающего критерия для экономического обоснования, стоимостной оценки качества используется суммарная технологическая себестоимость C_t , коп/мин, которая учитывает

не только себестоимость шлифования, но и расходы, связанные с токарной обработкой.

Основные параметры процесса шлифования определялись экспериментально-статистическим методом; основным источником информации являлся эксперимент, а методы математической статистики и теории вероятности применялись в качестве основных средств обработки результатов исследований. Опыты проводились по планируемому эксперименту, применялись планы, близкие к Д-оптимальному; при этом факторы варьируются на трёх уровнях, верхний и нижний уровни симметричны относительно центра плана и имеют целочисленные значения [15]. План, обозначенный в литературе как V_4 , используется для четырёх факторов: нормального давления P , скорости резания V , зернистости Z и концентрации κ .

Относительный расход алмазов подсчитывался на основе измерений размерного износа кругов (подробная методика, описание схемы и способы оценки величины износа приводятся в соответствующем разделе работы).

С учётом производительности шлифования и относительного расхода алмазов рассчитывалась удельная себестоимость шлифования. Износ режущих инструментов при точении измерялся непосредственно на станках по задней поверхности; величина штрихов износа h_z оценивалась с помощью приспособления на базе оптического отсчётного микроскопа МИР-2.

Суммарная технологическая себестоимость обработки рассчитывалась по методике, изложенной в работе [16]. Измерение и оценка значений исследуемых параметров производились на соответствующих современных приборах. Шероховатость шлифованной поверхности измерялась на профилографе-профилометре Surtronic 3+ фирмы TAYLOR-HOBSON. Характер износа алмазных кругов, режущей поверхности и зёрен, износ режущих твёрдосплавных пластин после точения изучались при помощи микрофотографий, полученных на металлографическом микроскопе МИМ-8 и электронном сканирующем – «Jeol-JSM-50». Исследование фазового состояния, деформации и соответственно остаточных напряжений в твёрдом сплаве проводилось на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0.

Основная серия экспериментов по работоспособности алмазных кругов с применением технологии минимальной смазки с использованием описанного выше твёрдого смазочного материала проводилась на базе универсально-заточного станка 3Д642Е; применялось специальное приспособление для реализации упругой схемы шлифования. Поскольку процесс алмазного шлифования осуществлялся с введением дополнительной энергии в зону резания, станок был модернизирован, что будет описано в соответствующем разделе. Дополнительная энергия в зону резания вводилась от специального генератора импульсов НО6506, с помощью которого переменный ток напряжением 380В преобразуется в униполярный импульсный с регулируемой частотой импульсов и значением величины тока.

Силовые зависимости, соотношение тангенциальных и радиальных составляющих сил резания для анализа энергоёмкости процесса и коэффициентов шлифования при взаимодействии рабочей поверхности круга с обрабатываемым материалом исследовались с помощью специального динамометра. В конструкции динамометра исключена возможность взаимовлияния нормальной и тангенциальной сил резания.

Стойкостные испытания твёрдосплавных пластин при механической обработке точением стали после шлифования проводились на токарно-винторезном станке 16К20. При исследовании процесса шлифования обрабатывались твёрдосплавные пластинки марок Т15К6 и ВК8 формы 0227 сечением 16×18×6 мм. При изучении остаточных напряжений и сравнительном анализе их формирования рассматривались также нешлифованные пластинки в исходном спеченном состоянии.

При исследованиях использовались алмазные круги формы 12А2-45°, изготовленные на Полтавском заводе искусственных алмазов и алмазного инструмента. Применялся комплект кругов различных соответствующих характеристик: металлическая токопроводная связка М1-01, алмазные зёрна марки АС6, зернистость кругов – от 50/40 до 200/160 и относительная концентрация – 2...6.

Выводы

1. Экологические аспекты являются важным фактором совершенствования СОТС и применения твёрдых смазочных материалов.
2. Технология минимальной смазки – альтернатива использованию СОТС поливом в процессе алмазно-искрового шлифования.
3. Оптимальным составом смазочного материала является смесь углеводородных стеариновой и себациновой кислот.
4. Перспектива применения твёрдых сухих смазочных материалов должна быть обоснована экономической целесообразностью, удобством использования и общей технологичностью процесса шлифования.

Глава 2 ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ С АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ

Ошибки – это наука, позволяющая двигаться вперёд.
Ченнинг

Взаимодействие режущей поверхности алмазных кругов с твёрдыми сплавами при шлифовании с применением технологии минимальной связки в виде твёрдых смазочных материалов (ТСМ) ранее не исследовалось.

Как известно, в практике металлообработки в настоящее время используются жидкие, газообразные и твёрдые смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

Применение твёрдых смазочных материалов (ТСМ) является важным фактором расширения технологических возможностей шлифования и является альтернативой использования жидких СОТС поливом. Применение твёрдых смазочных материалов, с помощью которых удобно реализовать технологию минимальной смазки, является весьма актуальным и перспективным, учитывая неизбежные затраты, а также известные экологические аспекты, связанные с использованием СОТС.

Наибольшее распространение в качестве твёрдых смазочных материалов получили графит, дисульфид молибдена, окислы и соли металлов, а также твёрдые органические соединения, такие, как углеводороды, воски, вещества жировой природы, полимерные материалы и т.д. [10, 81].

2.1 Обоснование состава твёрдого смазочного материала и его особенности

Следует заметить, что если на некоторых механических операциях (точение, сверление) подобная технология в последнее время находит применение, то при обработке шлифованием вообще не рассматривается [6, 13].

Важно также отметить, что с использованием технологии минимальной смазки представляется возможным отказаться от различных химических добавок, которые применяются для СОТС на водной основе, при этом устраняется разбрызгивание, появление вредных паров, сохраняется чистота зоны обработки.

Тенденции широкого использования и дальнейшего применения твёрдых сплавов, в том числе вновь создаваемых, при изготовлении различных инструментов, деталей штампов и многих других изделий машиностроения, несомненно, вызывают необходимость применения новых технологий шлифования.

Как известно, эффективное шлифование твёрдых сплавов может быть обеспечено при использовании алмазных кругов на металлических связках с введением в зону резания дополнительной энергии в виде электрических импульсов с помощью специальных генераторов. Это – процесс алмазно-искрового шлифования (АИШ), который реализуется с обратной полярностью (круг – анод, деталь – катод). Используемая, в необходимом количестве вместо полива, сухая смазка, в виде экологически чистых ТСМ различных модификаций СОТС, является диэлектрической средой, способствующей иницированию электрических разрядов; это обеспечивает устойчивое состояние режущей поверхности алмазных кругов и достижение стабильных условий его контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью твёрдого сплава. Подобранный необходимый состав смеси ТСМ в виде столбика определённого сечения с помощью простого устройства с небольшим усилием прижимается и постоянно контактирует с рабочей поверхностью алмазного круга.

Роль сухой твёрдой смазки следует рассматривать не только как средство обеспечения процесса АИШ за счёт иницирования электрических разрядов в зоне резания, но и как фактор возможного повышения обрабатываемости материалов и смазывающего эффекта.

Рассмотрим эти факторы.

Методы повышения обрабатываемости материалов в присутствии СОТС являются технологической реализацией эффекта Ребиндера – облегчение пластической деформации и образование новых поверхностей в результате снижения свободной поверхностной энергии твёрдого тела под воздействием окружающей среды. В основе эффекта Ребиндера лежит адсорбция на поверхности твёрдого тела адсорбционно-активных соединений – поверхностно-активных веществ (ПАВ), реакционно-активных молекул полифункциональных компонентов СОТС и продуктов их деструкции.

Различают физическую и химическую адсорбцию. В случае физической адсорбции полярные группы компонентов СОТС удерживаются на поверхности слабыми ванн-дер-ваальсовскими силами, обусловленными взаимодействием электромагнитных полей между атомами и молекулами СОТС и твёрдого тела. При химической адсорбции хемосорбционные плёнки удерживаются на поверхности твёрдого тела химическими связями, которые намного прочнее физических.

На основании исследований зависимости адсорбционной активности от химического состава ПАВ установлено, что прочность связи между поверхностно-активными молекулами и металлическими поверхностями возрастает в такой последовательности: сложные эфиры, спирты, карбоновые кислоты [10]. Это обстоятельство нами будет использовано при выборе оптимального состава ТСМ.

Наряду с повышением обрабатываемости материалов, базовые компоненты СОТС должны обеспечивать высокое смазывающее действие –

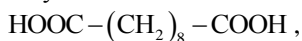
снижать микросхватывание, задираание, фрикционный нагрев и силы трения в контактной зоне «деталь–инструмент». Смазывающее действие СОТС осуществляется в результате образования на контактных поверхностях граничных плёнок, которые экранируют поверхности трения. Граничная смазка обусловлена действием плёнки, адсорбционно или химически связанной с трущейся поверхностью.

Типичная граничная смазка – это смазка плёнкой, образующейся в результате химического взаимодействия высших жирных кислот с ювенильной поверхностью металла. При этом продуктами реакции являются твёрдофазные мыла, молекулы которых химически привиты к поверхности, а длинные углеводородные цепи расположены перпендикулярно поверхности и образуют плотноупакованные пачки в виде молекулярного частокола, которые экранируют трущиеся поверхности. Поэтому жирные кислоты обладают высокой смазочной способностью.

Все высшие жирные кислоты (предельные и непредельные) являются поверхностно-активными веществами. Наличие карбоксильной группы обуславливает полярность их молекул.

На основании изложенного выше, в качестве базового компонента ТСМ был выбран стеарин технический, который в основной массе содержит твёрдые насыщенные жирные кислоты и имеет температуру плавления 49...52°C.

Для регулирования свойств ТСМ в зависимости от конкретных условий реализации процесса алмазно-искрового шлифования использовали себациновую кислоту, которая представляет собой двухосновную кислоту и имеет такую структуру молекулы:



то есть является полифункциональным кислородосодержащим соединением (ПФКС).

Температура плавления себациновой кислоты – 134°C. Она хорошо совмещается со стеариновой кислотой при сплавлении. Изменяя соотношение состава стеариновой кислоты и себациновой кислоты, можно изготавливать ТСМ с необходимыми для конкретного применения температурой плавления и твёрдостью.

К тому же известно, что ПФКС активируют процессы поверхностного деформирования и диспергирования материалов, то есть повышают их механическую обрабатываемость.

Отметим также, что применение ТСМ улучшает санитарно-гигиенические условия труда рабочих, т.к. при этом воздух не загрязняется аэрозолями смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и летучими токсичными продуктами механо-термического и биологического разложения присадок к ним различной химической природы. Кроме того, исключается возможность возникновения профессиональных кожных заболеваний (дерматозов и др.).

Для выбора рационального состава смеси ТСМ в процессе шлифования были проведены экспериментальные исследования с помощью специальной установки на базе универсально-заточного станка 3Д642Е, модернизированного для реализации процесса АИШ. Обрабатывались пластины твёрдого сплава Т15К6 формы 0227 сечением 18×16×6 мм. Алмазно-искровое шлифование образцов производилось кругом 12А2-45°АС6-100/80 М1-01-4; энергия единичных разрядов составляла $11 \cdot 10^{-4}$ Дж, частота импульсов – 88 кГц, нормальное давление $P_n = 1,2$ МПа, скорость резания – $V = 25$ м/сек.

Для выбора оптимального варианта ТСМ из различных компонентов использовались стеариновая кислота (стеарин), себациновая кислота, имеющая большую, чем стеарин температуру каплеобразования $T = 134^\circ\text{C}$ и их смесь в сравнении с традиционными СОТС струйным поливом, представляющими 3 %-ный содовый раствор воды.

Сравнительная оценка результатов анализа производилась по критериям производительности (Q , мм³/мин), относительному расходу алмазов (q , мг/г), удельной себестоимости ($C_{ш}$, коп/см³) и представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Значения показателей работоспособности алмазных кругов при различных диэлектрических средах

Диэлектрическая среда	Производительность Q , мм ³ /мин	Относительный расход алмазов q , мг/г	Удельная себестоимость $C_{ш}$, коп/см ³
СОТС, струйный полив	549,8	1,76	6,92
Стеарин	567,4	1,63	6,41
Себациновая кислота	525,7	1,87	7,63
Смесь равных частей стеарина и себациновой кислоты	638,3	1,32	6,04

На основании анализа результатов экспериментов с различными диэлектрическими средами установлено, что алмазно-искровое шлифование твёрдых сплавов с использованием смеси равных частей стеарина и себациновой кислоты можно считать наиболее целесообразным, т.к. при этом

обеспечиваются при большей производительности сравнительно меньшие значения удельной себестоимости и относительного расхода алмазов. Поэтому особенности взаимодействия алмазных кругов с обрабатываемым твёрдым сплавом при АИШ изучались с минимально подаваемой в зону резания сухой смазкой выявленного состава.

Предлагаемый к применению ТСМ является экологически безопасным средством. В его состав не входят традиционные для большинства СОТС серу-, хлор- и фосфорсодержащие противозадирно-противоизносные присадки, которые в результате термомеханической деструкции разлагаются в зоне резания с выделением в окружающую среду токсичных производных веществ, содержащихся в указанных присадках.

2.2 Определение электрических параметров алмазно-искрового шлифования

Процесс шлифования производился с помощью специального генератора импульсов, позволяющего получать искровые разряды. Во многих опубликованных работах показано, что такое шлифование более предпочтительно, чем процесс с использованием источников постоянного тока [2, 8]. В этих работах отмечается, что наиболее целесообразно применять высокочастотные генераторы, способные формировать и подавать в зону резания импульсы в том частотном диапазоне, в котором образуются стружки в процессе шлифования. Поэтому, при проведении исследований в качестве источника тока использовался, наряду с широкодиапазонным генератором импульсов ШГИ 40-440, специально изготовленный малогабаритный генератор (400×450×700 мм), принципиально мало отличающийся от серийно выпускаемых, но имеющий более узкий диапазон выходных электрических параметров; он достаточно надёжно обеспечивал процесс алмазно-искрового шлифования в конкретных условиях обработки твёрдых сплавов и удобен при внедрении процесса АИШ.

Как известно, при электроэрозионной обработке применяют два способа включения электродов – с прямой и обратной полярностью [17].

Процесс алмазно-искового шлифования (АИШ) первоначально использовался при обработке железоуглеродистой стали [8]; при этом обрабатываемый материал был в качестве анода, а алмазный круг – катода, т.е. применялась прямая полярность. Это обосновывалось тем, что воздействие эрозионных разрядов на материал (прямая полярность) способствовало предразрушению поверхностного слоя и, следовательно, облегчению съёма материала, т.е. более производительному процессу шлифования.

В работах, посвященных алмазному электроэрозионному шлифованию, отмечается, что для достижения развитой режущей поверхности алмазного круга и увеличения высоты выступания алмазных зёрен над уровнем связки

следует работать с обратной полярностью, при которой круг является анодом, а деталь – катодом. При обработке твёрдых сплавов в связи с их специфическими свойствами (гетерофазность), предразрушение может привести к трещинообразованию, поэтому оно нежелательно; а обеспечение активной самозатачиваемости режущего рельефа алмазного круга на металлической связке способствует созданию более благоприятных условий формирования качества поверхностного слоя твёрдых сплавов.

Энергию искровых разрядов, при использовании в качестве источника питания генераторов, наиболее удобно изменять и задавать варьированием частоты и скважности импульсов. Энергию единичных искровых разрядов можно определить по формуле:

$$W = I_{cp} U_{cp} \tau, \quad (2.1)$$

где I_{cp} , U_{cp} – среднее значение силы тока и напряжения в межэлектродном промежутке;

τ – время действия единичного импульса.

Величина τ определяется из соотношения

$$\tau = \frac{1}{n_{скв} f}, \quad (2.2)$$

где $n_{скв}$ – скважность импульсов;

f – частота следования импульсов.

Выбор энергии W для АИШ твёрдого сплава при применении установленного состава диэлектрической среды из твёрдого смазочного материала (ТСМ) производился из условия обеспечения минимальной удельной себестоимости шлифования. При этом фиксировались также производительность и относительный расход алмазов. Электрические параметры варьировались в широких пределах путём изменения частоты импульсов f с подсчётом времени действия единичного импульса и энергии разряда.

Результаты подсчёта отмеченных параметров и показатели работоспособности кругов представлены в табл. 2.2.

При этом средние значения силы тока и напряжения составляли соответственно $I_{cp} = 5 \text{ A}$, $U_{cp} = 40 \text{ В}$; в качестве оптимального было принято значение скважности $n_{скв} = 2$.

Отметим, что изменение скважности равноценно изменению общего количества энергии, подаваемой в зону контакта алмазного круга и обрабатываемой поверхности твёрдого сплава. Опыты показывают, что при прочих равных условиях уменьшение скважности приводит к более интенсивной правке круга и соответственно повышению его износа. Поэтому при назначении скважности следует учитывать импульсное напряжение и энергию разряда, исходя из условия необходимой величины среднего тока.

Уменьшение скважности вызывает также рост производительности; однако следует иметь в виду, что минимально допустимая скважность ограничивается необходимостью предотвращения затягивания длительности тока индуктивностью разрядной цепи и сохранения процесса воздействия энергии разряда.

Таблица 2.2 – Значение показателей работоспособности алмазных кругов для различных электрических параметров

Частота следования импульсов f , кГц	Время действия единичного импульса τ , мкс	Энергия единичного разряда W , Дж·10 ⁻⁴	Производительность шлифования Q , мм ³ /мин	Относительный расход алмазов q , мг/г	Себестоимость шлифования $C_{ш}$, коп/см ³
22	22,7	45,4	723,4	2,27	6,84
44	11,4	22,8	670,3	1,86	6,23
66	7,6	15,2	645,6	1,45	5,83
88	5,7	11,4	638,7	1.32	6,04

Зависимость показателей работоспособности алмазных кругов – производительности, относительного расхода алмазов и удельной себестоимости шлифования от параметров вводимой дополнительной энергии в зону резания представлена на рис. 2.1.

Понятно, что большие значения энергии импульсов, несмотря на более высокую производительность, приводят к интенсивному разрушению связки круга и существенному увеличению относительного расхода алмазов и удельной себестоимости.

Зависимость удельной себестоимости шлифования твёрдого сплава от частоты импульсов и соответственно вводимой энергии имеет экстремальный характер. Он связан с различным влиянием энергии единичных разрядов на производительность процесса и износ алмазного круга. В диапазоне частот от 22 до 66 кГц износ уменьшается в 1,6 раза, а производительность – в 1,1 раза.

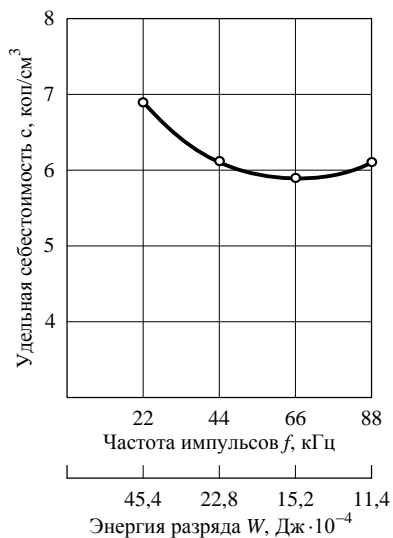
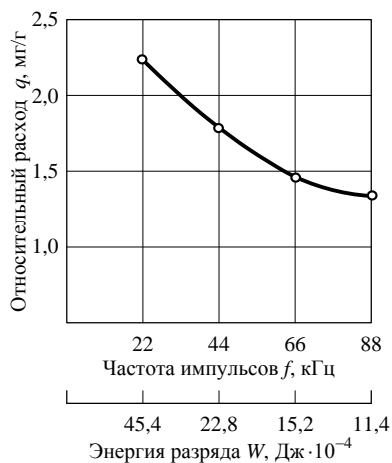
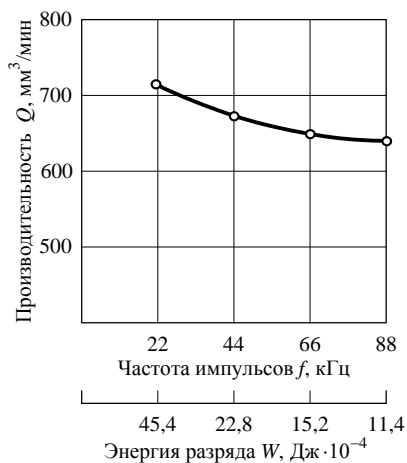


Рисунок 2.1 – Влияние параметров импульсного тока на работоспособность алмазных кругов.

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с;

круг 12A2-45°AC6100/80 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6

Более интенсивное уменьшение износа по сравнению с производительностью приводит к снижению удельной себестоимости шлифования до частоты 66 кГц. Дальнейшее повышение частоты импульсов свыше 66 кГц ($W < 15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж) вызывает преобладающее уменьшение

производительности по сравнению с износом круга. В результате полученного соотношения показателей процесса отмечается повышение удельной себестоимости шлифования, и зависимость имеет экстремальный характер.

В процессе электроэрозионной обработки определённое значение имеет и форма импульса. Однако при АИШ она практически не влияет на работоспособность алмазных кругов и эффективность процесса обработки [18]. Вместе с тем, целесообразно отметить, что при работе с короткими импульсами некоторое предпочтение рекомендуется отдавать импульсам с крупным фронтом подъёма тока, т.е. прямоугольным импульсом, т.к. они обеспечивают локализацию энергии на поверхности срезаемого материала и удаляемой стружки, что повышает эффективность эрозионного воздействия.

Таким образом, в результате анализа переменных электрических параметров алмазного электроэрозионного шлифования обоснован выбор и определены его электрические характеристики ($f = 66$ кГц, $W = 15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж, $n_{\text{скв}} = 2$, $\tau = 7,6$ мкс), которые обеспечивают высокую работоспособность алмазных кругов в процессе АИШ с применением ТСМ при наименьших затратах на его осуществление.

2.3 Анализ взаимосвязи режимов резания и характеристик кругов с электрическими параметрами в процессе АИШ

Процесс алмазного электроэрозионного шлифования, в том числе и АИШ, основан на гипотезе стружечного замыкания [8, 18, 19]. Образующиеся при шлифовании стружки являются инициаторами возникновения искровых разрядов между связкой инструмента и шлифуемой деталью, подключенных к разным полюсам генератора импульсов. Возникновение искровых разрядов при определенных режимах приводит к стиранию части стружек и эрозии материала, расположенного в межзёрненном пространстве (продукты шлифования или связка).

Длительность разряда, возникающего от замыкания межэлектродного зазора стружкой, срезаемой зерном, можно определить по формуле [18]

$$\tau = \frac{\beta L}{1000 V}, \quad (2.3)$$

где β – коэффициент, учитывающий время, за которое произойдет замыкание электродов с момента врезания алмазного зерна ($\beta < 1$);

L – длина дуги контакта (длина среза) алмазного зерна с обрабатываемым материалом;

V – скорость вращения круга.

Из формулы (2.3) видно, что длительность разряда, инициированного стружкой, прямо пропорциональна длине дуги контакта (длине среза) и уменьшается с увеличением скорости резания. В зависимости от длины дуги

контакта и физико-механических свойств обрабатываемого материала изменяется длина среза стружки и её качество на рассматриваемой длине среза. Если предположить, что на длине дуги контакта L образуется n элементарных стружек длиной l , то формулу (2.3) можно представить в виде:

$$\tau = \frac{\beta n l}{1000 V}, \quad (2.4)$$

где n – число элементарных стружек на длине дуги контакта;

l – длина элементарной стружки.

Из формулы (2.4) следует, что длительность разряда τ замыкания межэлектродного зазора замыкаемой стружкой зависит от количества и длины срезаемых стружек. В процессе алмазного электроискрового шлифования твёрдого сплава, например, совместно со сталью, срезаемая алмазным зерном стальная стружка будет длиннее твёрдосплавной. Поэтому она будет чаще переключать межэлектродный зазор, что, естественно, приведет к увеличению количества разрядов в зоне шлифования и их длительности согласно формуле (2.4). В связи с этим, стальная державка может выполнять роль дополнительного правящего электрода и способствовать поддержанию режущей способности алмазного круга. В этом заключается одна из основных отличительных особенностей алмазного электроискрового шлифования твёрдого сплава совместно со стальной державкой от обычного алмазного шлифования без ввода дополнительной энергии в зону резания. При алмазном шлифовании срезаемая стальная стружка, попадая в межзёрненное пространство, интенсивно засаливает алмазный круг, снижает его режущую способность, увеличивает износ.

Для установления взаимосвязи производительности шлифования с электрическими параметрами алмазного электроискрового шлифования выразим её величину через соотношение

$$Q = \frac{S_c L}{T}, \quad (2.5)$$

где S_c – суммарная площадь, срезаемая внедрившимися зёрнами;

L – длина дуги контакта алмазного зерна с обрабатываемым материалом;

T – время шлифования.

Подставив значение L – из формулы (2.3) в формулу (2.5), получим

$$Q = \frac{1000 V S_c \tau}{\beta T}. \quad (2.6)$$

Приняв длительность разряда τ равной длительности импульсов и используя формулы (2.1) и (2.6), определим величину Q с учётом энергии единичного искрового разряда:

$$Q = \frac{1000 V S_c W}{\beta T U_{cp} I_{cp}}. \quad (2.7)$$

Подставляя значение W и совместив с τ формулы (2.5) и (2.4), получим

$$Q = \frac{1000 VS_c}{\beta T f n_{\text{скв}}} \quad (2.8)$$

Из формул (2.7) и (2.8) следует, что с увеличением энергии искровых разрядов и уменьшением их частоты и скважности производительность шлифования будет возрастать. Это подтверждается и экспериментальными зависимостями (см. рис. 2.1). Величина Q будет ограничиваться допустимой величиной энергии разряда, не вызывающей теплового повреждения алмазных зёрен и износа алмазного круга сверх лимитируемого, связанного с интенсивным выжиганием связки.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что с целью сохранения высокого качества алмазных зёрен, лунки от единичных разрядов на рабочей поверхности круга должны распределяться с определенным шагом [18]. Наиболее универсальным параметром, влияющим на шаг лунок, качество шлифуемой поверхности и скорость съёма связки, является частота импульсов f . Ее взаимосвязь со скоростью вращения круга и его характеристиками может быть выражена формулой [18]

$$f = 0,079 \frac{V \kappa^{0,5}}{d_3}, \quad (2.9)$$

где κ – концентрация зёрен алмазного круга, проценты;

d_3 – средневероятный размер алмазного зерна.

Как следует из формулы (2.9), частота импульсов возрастает с увеличением скорости резания, концентрации зёрен алмазного круга и с уменьшением зернистости. Используя формулы (2.4), (2.5) и (2.9), можно установить влияние скорости резания и характеристики алмазных кругов на энергию искрового разряда:

$$W = \frac{I_{\text{ср}} U_{\text{ср}} d_3}{0,079 V \kappa^{0,5} n_{\text{скв}}} \quad (2.10)$$

Анализ формулы (2.10) показывает, что в процессе АИШ с увеличением скорости резания, концентрации зерен, уменьшением зернистости круга энергия искровых разрядов будет уменьшаться. Это приведет к снижению эффекта эрозионного восстановления режущих свойств алмазного круга и уменьшению производительности процесса обработки. Данное положение может быть подтверждено зависимостью производительности от энергии разряда согласно формуле (2.10). Таким образом, из аналитических зависимостей (2.6) и (2.10) следует, что режущей способностью алмазного круга и электрической эрозией в процессе шлифования можно управлять за счёт изменения электрических параметров, механических режимов резания и характеристик круга. Полученные зависимости позволяют более обоснованно анализировать результаты экспериментальных исследований процесса АИШ.

2.4 Исследование и анализ коэффициентов шлифования

На основании результатов экспериментов с различными диэлектрическими средами установлено, что АИШ с использованием смеси равных частей стеарина и себациновой кислоты можно считать наиболее целесообразным, так как при этом обеспечивается при большей производительности сравнительно меньшие значения удельной себестоимости и относительного расхода алмазов. Поэтому особенности взаимодействия алмазных кругов с обрабатываемым твёрдым сплавом при АИШ изучались с оптимально подаваемой в зону резания сухой смазкой выявленного состава.

Оценка обрабатываемости твёрдых сплавов с применением техники минимальной смазки в технологии АИШ представляется весьма важным. Как было показано ранее, были установлены оптимальные электрические параметры процесса по наименьшей удельной себестоимости шлифования, а именно – среднее значение величины электрического тока $I_{cp} = 5$ А при напряжении $U_{cp} = 40$ В, частота электроимпульсов составила $f = 66$ кГц при скважности $n_{скв} = 2$.

Удобным критерием, характеризующим обрабатываемость материала, особенности процесса при сравнительной оценке привлекательности различных применяемых сред в зоне шлифования, является коэффициент шлифования ($K_{ш}$). Он отражает состояние развитости рельефа, условия внедряемости его в поверхность обрабатываемого материала. Коэффициент шлифования меньше единицы, его значение может приближаться к коэффициенту трения контактирующей пары, состоящей из обрабатываемого материала и режущей поверхности круга [20], поскольку процесс ведется по упругой схеме шлифования.

Коэффициент шлифования оценивается как отношение тангенциальной силы P_z к радиальной P_y [21, 22]:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}. \quad (2.11)$$

Сравнительные исследования проводились при шлифовании твёрдого сплава Т15К6 с применением ТСМ и СОТС поливом на универсально-заточном станке модели ЗД642Е. Станок был модернизирован для возможности обработки методом АИШ. Дополнительная энергия в зону резания вводилась с помощью упомянутого ранее специального генератора импульсов. Измерение и сравнительная оценка усилий резания по упругой схеме производились с помощью специального динамометра (рис. 2.2), который устанавливался на специальное приспособление, обеспечивающее принятую схему шлифования.

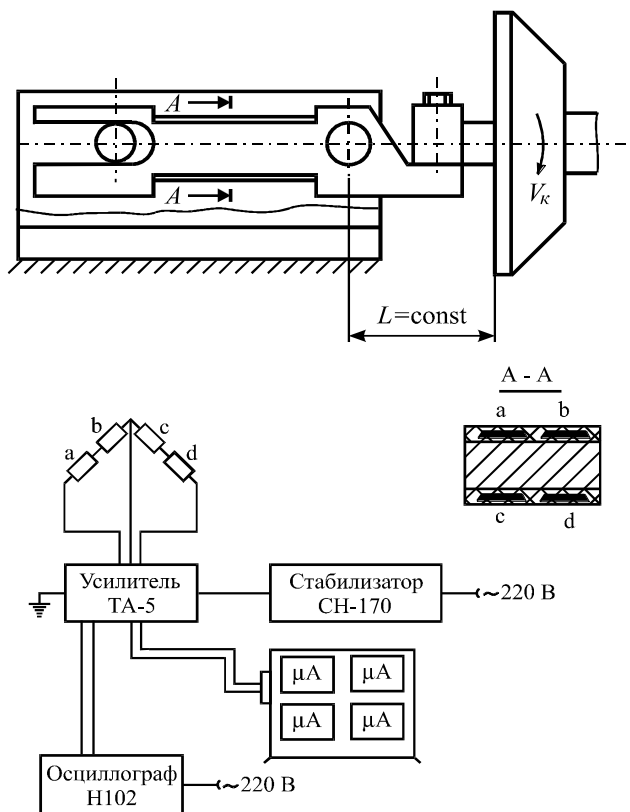


Рисунок 2.2 – Схема динамометра

Применялась специальная форма тензометрической балки; для повышения точности измерения тангенциальной силы P_z её необходимо разгрузить от сжимающих усилий. Ось заготовки и балки, воспринимающей изгибающее усилие, совмещены; в передней части балки находится шарнир, а в задней – опора, расположенная в пазу и не воспринимающая осевую нагрузку. Эта опора препятствует вращению балки вокруг шарнира и способствует её изгибу.

Таким образом, исключается влияние нормальной силы P_y на измеряемую тангенциальную силу P_z . Постоянное значение силы P_y задавалось с помощью специального нагружающего устройства.

Между опорами с двух сторон расположены по два наклеенных фольговых тензорезистора сопротивления типа 2ФКТК; сопротивление

каждого датчика составляло по 100 Ом, они закреплялись, а затем покрывались с помощью эпоксидного клея холодного отверждения.

Датчики попарно соединялись последовательно, а затем – в полумост. Измерялось сопротивление в плечах полумоста от степени деформации балки. Тензометрический усилитель ТА-5, имеющий настроечный полумост, усиливал сопротивление в плечах полумоста. Сопротивление тензодатчиков изменяется в зависимости от тангенциальных усилий и регистрируется с помощью осциллографа Н102, а также миллиамперметра.

При постоянном вылете шлифуемого образца строились при статическом нагружении тарировочные графики (рис. 2.3).

Исследование коэффициентов шлифования $K_{ш}$ производилось при шлифовании пластин твёрдого сплава Т15К6 формы 0227. Образцы шлифовались алмазным кругом 12А2-45°АС6100/80 М1-01-4. Алмазно-искровое шлифование производилось с обратной полярностью, энергия единичных разрядов составляла $15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж при частоте импульсов 66 кГц; нормальное давление $P_n = 1,2$ МПа, скорость резания $V = 25$ м/с.

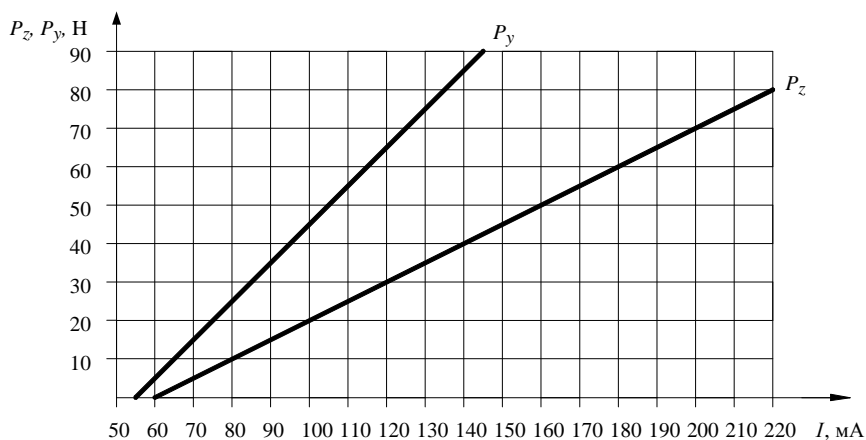


Рисунок 2.3 – Тарировочные графики

Изучалось влияние различных факторов, а значит и различных условий контактного взаимодействия рабочей поверхности алмазного круга со шлифуемой поверхностью твёрдого тела.

Влияние нормального давления на $K_{ш}$ представлено на рис. 2.4.

Увеличение нормального давления вызывает рост коэффициентов шлифования для обоих способов шлифования. Активный режущий рельеф алмазного круга при АИШ обеспечивает хороший уровень внедряемости микрокромки алмазных зёрен в обрабатываемую поверхность твёрдого

сплава, что способствует опережающему росту тангенциальной силы; это можно считать главным фактором, определяющим характер зависимостей.

Кроме того, из графиков следует, что для способа шлифования с ТСМ значения коэффициентов шлифования меньше во всем диапазоне увеличения нормальных давлений. Это объясняется меньшим вкладом доли коэффициента трения между металлической связкой алмазного круга и твёрдым сплавом в общее значение коэффициента шлифования.

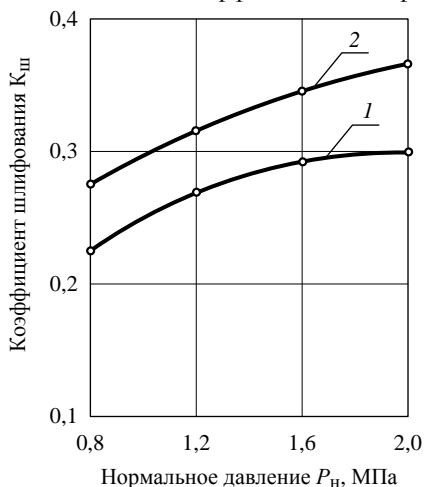


Рисунок 2.4 – Влияние нормального давления на коэффициент шлифования:

1 – сухая смазка; 2 – СОТС поливом.

Условия шлифования: $V = 25$ м/с; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Зависимость $K_{ш}$ от скорости шлифования для разных технологических сред в зоне резания характеризуется его практически незаметным изменением для СОТС поливом и увеличением для сухой углеводородной смазки (рис. 2.5).

Отмеченный характер изменения зависимости $K_{ш}$ (кривая 2) объясняется постоянством сил резания, что, по-видимому, обусловлено практически неизменным значением коэффициента трения в зоне контакта алмазных зёрен с твёрдым сплавом в зоне высоких скоростей взаимодействия. Известно также, что, например, при тонком алмазном точении материалов, не вступающих в адгезионное взаимодействие с алмазом, силы резания с ростом скорости точения не изменяются [23].

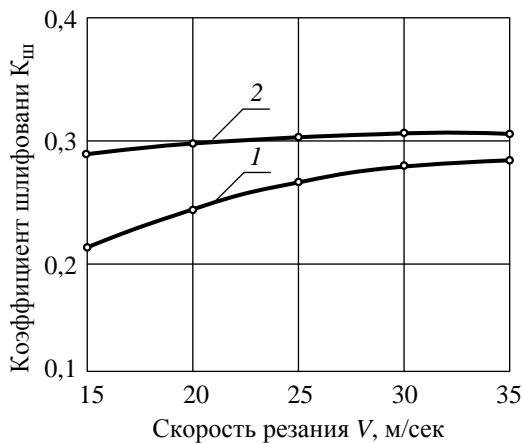


Рисунок 2.5 – Влияние скорости резания на коэффициент шлифования:
 1 – сухая смазка; 2 – СОТС поливом.

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Увеличение коэффициента шлифования (кривая 1) при изменении скорости резания можно объяснить ростом мгновенного сечения среза, которое зависит от количества одновременно контактирующих рабочих зёрен; число этих зёрен определяется реальной шероховатостью обрабатываемой поверхности. Как известно шероховатость поверхности с ростом скорости резания снижается, что способствует меньшей вероятности мгновенного проскальзывания алмазных зёрен и их микрокромки вне контакта с микронеровностями обрабатываемой поверхности твёрдого сплава и более полному контакту зёрен по ширине с выступами микронеровностей. Увеличение вероятности удаления материала и числа контактирующих с ним зерен при повышении скорости было установлено также при обычном абразивном шлифовании [24, 25].

Следовательно, изменяющиеся с увеличением скорости резания условия взаимодействия устойчиво развитого режущего рельефа алмазного круга с обрабатываемым материалом способствуют росту мгновенного сечения среза, а значит, и тангенциальной силы резания, что и вызывает повышение коэффициента шлифования.

При АИШ твёрдых сплавов изменение зернистости в диапазоне от 50/40 до 160/125 незначительно влияет на изменение $K_{ш}$ в отличие от обычного алмазного шлифования; при этом для процесса с ТСМ его значение несколько ниже (табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Влияние зернистости на коэффициент шлифования при АИШ

Условия шлифования	Зернистость			
	50/40	80/63	100/80	160/125
СОТС, полив	0,25	0,28	0,31	0,32
ТСМ	0,24	0,26	0,27	0,29

Несущественное влияние зернистости алмазных кругов при АИШ твёрдых сплавов можно объяснить как развитостью режущего рельефа, так и образованием микрокромки на поверхности более крупных и менее прочных зёрен, что в какой-то степени нивелирует количественный фактор (число микрокромки) мелкозернистых кругов.

Влияние концентрации алмазов на $K_{ш}$ более заметно, чем влияние зернистости, но каких либо особенностей не выявляет; общее объяснение можно свести к традиционному количественному фактору, незначительным увеличением сил резания и суммарного сечения среза.

Кроме изложенных результатов экспериментов, объясняющих характер зависимостей, можно сделать общий вывод, что значения $K_{ш}$ при АИШ твёрдых сплавов с сухой смазкой меньше, чем при обычном шлифовании с СОТС поливом, а значит меньше и напряжённость процесса шлифования.

2.5 Энергоёмкость процесса шлифования

Энергетическая характеристика процесса шлифования является весьма важным фактором, особенно в условиях активного самозатачивания и развитого режущего рельефа круга.

С целью расширения возможностей применения и для более достоверной оценки эффективности предлагаемого ТСМ, наряду с оценкой коэффициентов шлифования, представляется целесообразным проведение исследований и анализ энергоёмкости процесса обработки твёрдых сплавов в различных условиях АИШ в сравнении с использованием СОТС поливом.

В качестве критериев целесообразно оценить и удельную энергоёмкость B_m [26], и удельную работу шлифования $A_{уд}$ [22, 27].

В связи с изложенным представляет интерес сравнительный анализ энергоёмкости процесса шлифования твёрдого сплава с традиционной СОТС поливом и упомянутой выше смесью ТСМ.

Удельная энергоёмкость шлифования (B_m) определялась энергией (работой), затраченной на съём массы твёрдого сплава в единицу времени (ΔM):

$$V_m = \frac{A_{уд}}{\Delta M},$$

где A – работа, Дж;
 ΔM – масса, кг.

Работа шлифования ($A_{уд}$) определялась как произведение тангенциальной силы P_z и скорости резания V ; масса материала пересчитывалась по результатам оцениваемой производительности Q_m , мм³/мин; усилие резания измерялось с помощью специального динамометра по упругой схеме шлифования.

Результаты экспериментов по влиянию нормального давления на энергоёмкость процесса АИШ представлены в табл. 2.4. Во всем диапазоне изменения нормальных давлений значения V_m меньше для ТСМ по сравнению с СОТС поливом. Общая тенденция незначительного изменения показателя энергоёмкости при увеличении нормального давления объясняется соответственно пропорциональным ростом производительности шлифования.

Таблица 2.4 – Влияние нормального давления на удельную энергоёмкость V_m , Дж/г·10³ при АИШ Т15К6

Диэлектрическая среда	Нормальное давление P_n , МПа			
	0,8	1,2	1,6	2,0
СОТС, струйный полив	5,5	5,4	5,2	5,3
ТСМ	4,6	4,4	4,5	4,7

Изменение скорости резания характеризуется более выраженным влиянием её на V_m , чем нормальное давление (рис. 2.6). С увеличением скорости V_m растёт как при шлифовании с СОТС поливом, так и при использовании ТСМ; при этом интенсивность роста удельной энергоёмкости при шлифовании с введением в зону резания твёрдого смазочного материала значительно меньше, что можно объяснить более активной самозатачиваемостью режущего рельефа алмазного круга и соответственно большим съёмом материала.

Возможности использования ТСМ наиболее эффективно могут проявиться при АИШ твёрдого сплава совместно со стальной державкой, т.к. при этом с одной стороны более полно будут активироваться процессы, связанные с образованием новых поверхностей (эффект Ребиндера), а с

другой – адсорбционно связанная с обрабатываемой поверхностью граничная плёнка надёжно экранирует трущиеся поверхности.

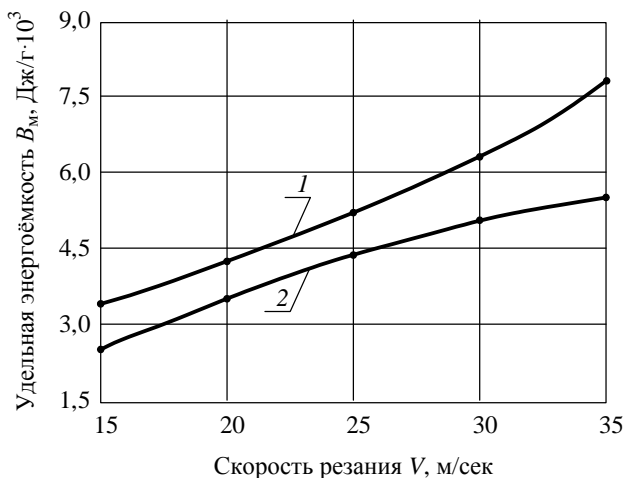


Рисунок 2.6 – Влияние скорости резания на энергоёмкость при АИШ:

1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ.

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа ; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6

Последнее обстоятельство будет нивелировать диффузионное взаимодействие поверхности алмазных зёрен со сталью в связи с известными положениями о сродстве контактирующих материалов и перепаде концентраций углерода в них [28, 29], что вызывает повышенный износ кругов. Следует заметить, что при исследовании энергоёмкости шлифования композиций различных материалов, отличающихся плотностью, более удобно пользоваться критерием, оценивающим удельную работу, затрачиваемую на объёмный съём материала:

$$A_{уд} = \frac{P_z V}{Q_m},$$

где P_z – тангенциальная сила резания;

V – скорость резания;

Q_m – производительность процесса.

Увеличение нормального давления вызывает повышение удельной работы шлифования для различных условий АИШ (рис. 2.7), однако

применение ТСМ способствует меньшим значениям $A_{уд}$ во всем диапазоне изменения P_n .

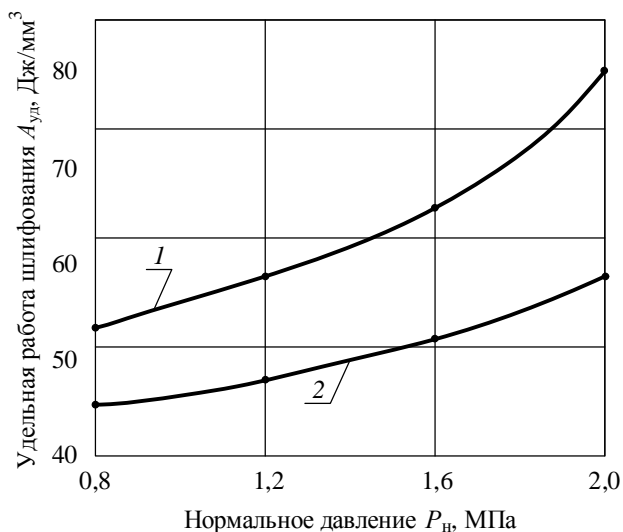


Рисунок 2.7 – Влияние нормального давления на удельную работу АИШ:
1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ.
Условия шлифования: $V = 25$ м/сек ; круг 12А2-45°АС6-100/80 М1-01-4;
обрабатываемый материал Т15К6 + ст. 45

Несмотря на то, что с рабочей поверхностью алмазного круга контактирует такая же, как и твёрдого сплава, площадь стальной пластины из композиции Т15К6+сталь 45, обнаруживается более замедленный темп роста $A_{уд}$ при шлифовании с ТСМ. Это можно объяснить сохранением достаточно устойчивого состояния режущего рельефа во времени, что подтверждается суммарным ростом производительности, который незначительно отстает от увеличения работы резания.

Преимущества применения ТСМ по сравнению с СОТС поливом более заметно проявляются при увеличении скорости резания (рис. 2.8).

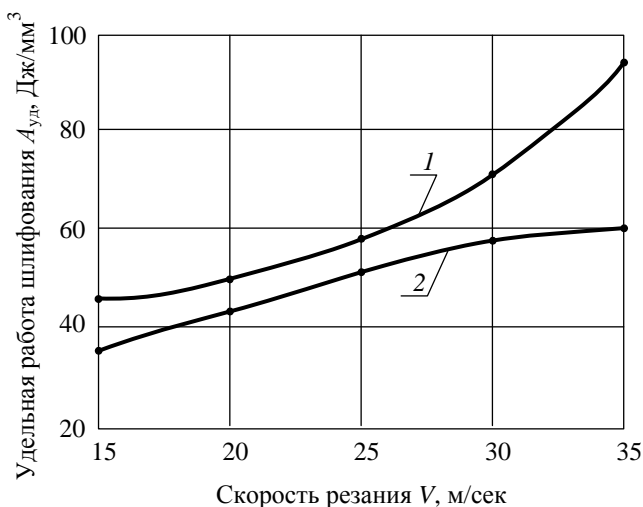


Рисунок 2.8 – Влияние скорости резания на удельную работу АИШ:

1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ.

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа ; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6 + ст45

Количественный фактор, характеризующий числом встреч в единицу времени алмазных зёрен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, с ростом скорости проявляется в том случае, если развитость рабочей поверхности круга сохраняется даже при больших термодинамических нагрузках на его режущий рельеф. Следовательно, можно констатировать преимущества использования ТСМ за счёт существенного повышения производительности шлифования, что способствует незначительному изменению энергоёмкости и заметному снижению темпа её роста; при этом шлифование с СОТС поливом вызывает довольно интенсивный рост $A_{уд}$, что свидетельствует о значительном отставании производительности шлифования от увеличивающейся работы резания.

Выявленное преимущество шлифования твёрдых сплавов, в том числе и композиции «твёрдый сплав-сталь» с применением ТСМ объясняется специфическим механизмом воздействия смазочной среды на адсорбируемые поверхности обрабатываемых материалов. Высокие локальные температуры при АИШ вызывают деструкцию среды, обеспечивают дозированный (без избытка) постоянный приток (присутствие) групп легкоподвижных атомов из карбоксильной составляющей и углеводородных радикалов поверхностно-активного компонента в зоне резания.

Массовое микрорезание – царапание при алмазном шлифовании сопровождается совокупностью условий для проявления эффекта Ребиндера. Высокие локальные напряжения и скорости воздействия, циклический характер нагрузки, весьма малый съём материала за один контакт (проход) алмазного зерна, в результате чего атомы активной среды должны преодолеть лишь небольшой путь к зоне разрушения, к истокам образующейся опережающей микротрещины, обеспечивая надёжное смачивание обнажаемой ювенильной поверхности – всё это способствует физической и химической адсорбции, а также смазывающему действию среды ТСМ.

Следует отметить, что согласно известному критерию Гриффитса, при хрупком разрушении прочность пропорциональна корню квадратному из величины поверхностной энергии. В соответствии с этим, понижению прочности в несколько раз должно отвечать понижение свободной поверхностной энергии, примерно на порядок [30]. Поэтому, если ТСМ в связи с инициированием адсорбционных эффектов вызывает понижение свободной поверхностной энергии, то, естественно, должна уменьшаться хрупкая прочность твёрдых сплавов и работа диспергирования. Именно поэтому при АИШ с ТСМ по сравнению с СОТС поливом имеют место более низкие значения удельной работы резания, особенно при повышенных нормальных давлениях и скоростях шлифования (см. рис 2.8).

Таким образом, можно считать, что применение твёрдого смазочного материала, представляющего смесь равных частей стеариновой и себациновой кислот (ТСМ), по сравнению с СОТС поливом при использовании в условиях АИШ является весьма перспективным направлением, отвечающим современным тенденциям развития технологии минимальной смазки.

2.6 Состояние режущей поверхности и особенности износа алмазных кругов

Технология минимальной смазки с применением твёрдых смазочных материалов (ТСМ) вносит ряд особенностей в характер изменения режущего рельефа и механизм износа алмазных зёрен в кругах и кругов в целом.

Износу алмазных зёрен посвящено довольно много работ [28, 31, 32, 33, 34, 35]. Поэтому в этом разделе будут представлены лишь некоторые отличительные особенности, присущие и имеющие место в рассматриваемом процессе обработки.

Исследование режущей поверхности алмазных кругов показало, что в процессе алмазного искрового шлифования она подвергается комбинированному износу и имеет хорошо развитый рельеф. При АИШ искровые разряды, действуя на срезаемую стружку и связку круга, практически устраняют её контакт с обрабатываемым материалом, удаляют продукты шлифования и обеспечивают увеличение, как количества алмазных

режущих зёрен, так и высоты их выступания над уровнем связки; при этом сохраняется и средняя разновысотность зёрен.

В результате увеличения высоты выступания зёрен над уровнем связки они могут достигать в процессе шлифования предельных толщин среза. В этом случае возрастают динамические и тепловые нагрузки на зерно, на его поверхность, что может привести или к его разрушению с образованием новых микрокромки, или к вырыванию из связки при оставшейся небольшой глубине залегания, когда оно уже слабо закреплено в ней. В ряде случаев на зёрнах образуются и площадки износа, особенно, когда производится обработка твёрдых сплавов совместно со стальной державкой; при этом уменьшаются относительные толщины среза и радиуса округления зерна (a_z/ρ), что способствует возрастанию удельных нагрузок, разрушению площадок износа и сколам отдельных элементов зерна.

Следует отметить, что при АИШ, как с применением СОТС поливом, так и с технологией минимальной смазки (ТСМ), засаливание режущей поверхности, сглаживание рельефа практически не обнаруживается; это, в основном, характерно при обработке твёрдых сплавов. При обработке твёрдого сплава совместно со стальной державкой на некоторых участках рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании с СОТС поливом появляются отдельные фрагменты с элементами засаливания. При АИШ с ТСМ таких участков не наблюдается.

Ниже представлены некоторые результаты исследований состояния режущей поверхности алмазных кругов и зёрен, фрагменты износа, которые изучались с помощью электронного сканирующего микроскопа Jeol-JSM-50.

Шлифование твёрдосплавных пластин Т15К6 совместно со стальной державкой производилось кругами одинаковой характеристики (связка М1-01, зернистость 100/80, концентрация 4) со скоростью резания $V = 25$ м/с и давлением $P = 1,2$ МПа. На фотографиях показаны рабочие поверхности алмазных кругов после шлифования с применением СОТС поливом (рис. 2.9 а) и с использованием технологии минимальной смазки (рис. 2.9 б).

Как видно, в первом случае поверхность круга менее развита, хорошо просматривается сглаженный участок рельефа, его засаленная часть и менее развитая поверхность. При АИШ с ТСМ рельеф хорошо развит, участков засаливания, т.е. перекрытия выступающих алмазных зёрен не обнаружено. Преимущества ТСМ во влиянии на механизм износа кругов и активную самозатачиваемость можно, по-видимому, объяснить тем, что более интенсивно инициируются электрические разряды в этой диэлектрической среде. Кроме того, как уже отмечалось, при химической адсорбции хемосорбционные пленки удерживаются на поверхности твёрдого тела химическими связями, которые значительно прочнее физических. В этом смысле карбоновые кислоты, входящие в состав ТСМ, обеспечивают более

прочные связи между поверхностно-активными молекулами и металлическими поверхностями («твёрдый сплав + сталь»).

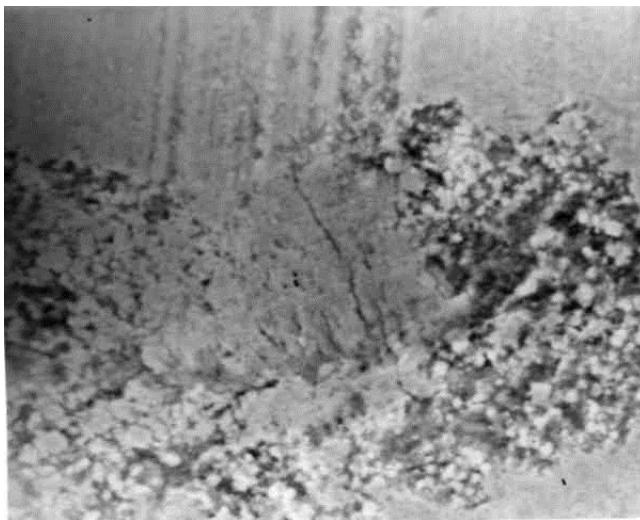
Активная самозатачиваемость режущего рельефа обеспечивается воздействием эрозионных разрядов на связку и ударно-циклическим взаимодействием алмазных зёрен с обрабатываемым твёрдым сплавом. По мере износа круга из матрицы связки при АИШ зарождаются и появляются новые зёрна, которые ещё не являются достаточно активными (рис. 2.10).

На фотографиях (рис. 2.11 *а, б*) отчётливо видна развитая режущая поверхность, просматривается разновысотность зёрен рельефа (рис. 2.11 *а*) и весьма активное выступание зёрен над уровнем связки (рис. 2.11 *б*).

Характер состояния режущей поверхности собственно алмазных зёрен позволяет заключить, что наиболее распространённым видом их износа при АИШ с применением технологии ТСМ является хрупкое разрушение (рис. 2.12). Природа последнего объясняется тем, что в результате ударного циклического нагружения зерна в неё распространяются волны деформации, под действием которых зарождаются и развиваются усталостные трещины, приводящие к сколам и микровыкрашиваниям алмазного зерна [35]. Можно также отметить, что площадок износа, явно выраженных, практически не возникает.

В ряде работ было показано, что при обработке твёрдых сплавов развитость режущей поверхности алмазных зёрен сохраняется практически до полного износа [10, 35, 36, 43]. При этом установлено, что отдельные микрокромки зерна способны производить резание твёрдого сплава при весьма малых толщинах среза. В связи с этим, можно считать, что на поверхности режущих кромок возникает субмикрорельеф. О роли субмикрорельефа алмазных зёрен в формировании обработанной поверхности указывалось ранее в работах [37, 38].

Особенно отчётливо субмикрорельеф виден на фотографиях рис. 2.13 *а, б*. На сколах отдельных участков поверхности алмазных зёрен отчетливо видны субмикрокромки (рис. 2.13 *а*); микровыкрашивание зёрен происходит в результате сколов по иррациональной поверхности [36, 39]. При большем увеличении просматриваются ступени скола (рис. 2.13 *б*), они имеют относительно гладкий рельеф, их высота может составлять доли микрона, а ширина достигает нескольких микрон. Следовательно, такой субмикрорельеф на алмазных зёрнах (в данном случае на зёрнах марки АС6) можно считать положительным фактором при обработке твёрдых сплавов, особенно на доводочных чистовых операциях шлифования.



a



б

Рисунок 2.9 – Поверхность алмазных кругов после шлифования:
a – СОРС; *б* – ТСМ.

Условия шлифования: АИШ; $V = 25$ м/сек; $P_n = 1,2$ МПа; $f = 66$ кГц;
круг 12А2-45°АС6-100/80 М1-01-4;
обрабатываемый материал Т15К6 + ст. 45

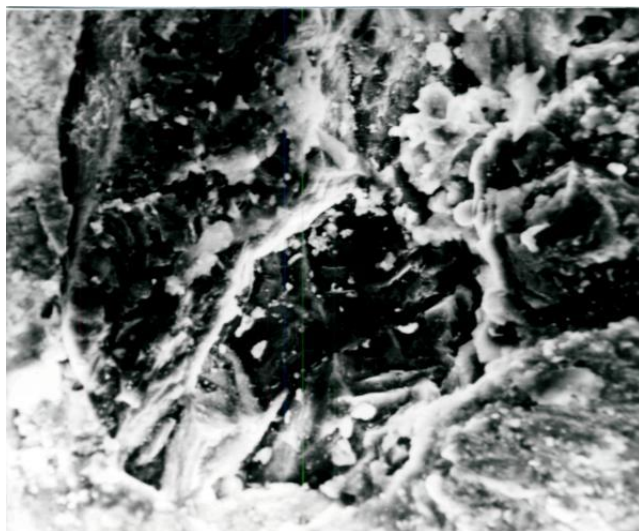
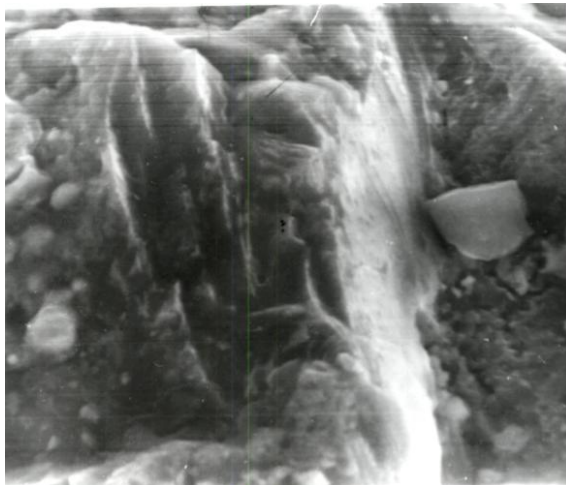


Рисунок 2.10 – Появление новых зёрен из матрицы связки.
Условия шлифования: АИШ; $V = 25$ м/сек ; $P_n = 1,2$ МПа ; $f = 66$ кГц;
круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6



a



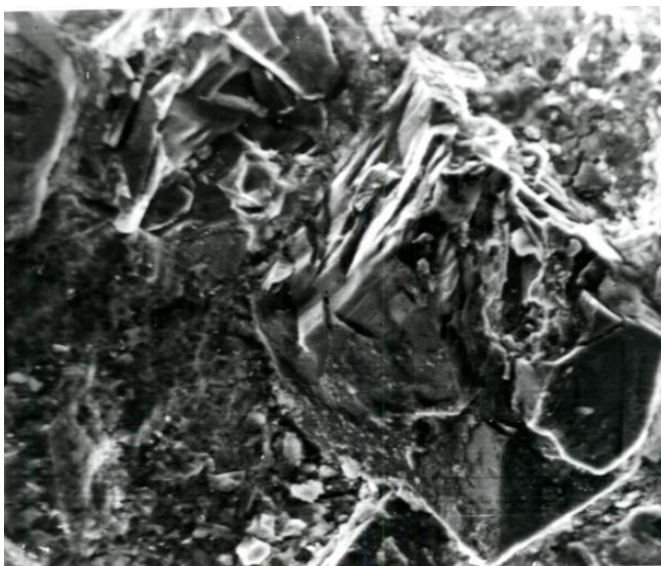
б

Рисунок 2.11 – Развитая рабочая поверхность алмазного круга:

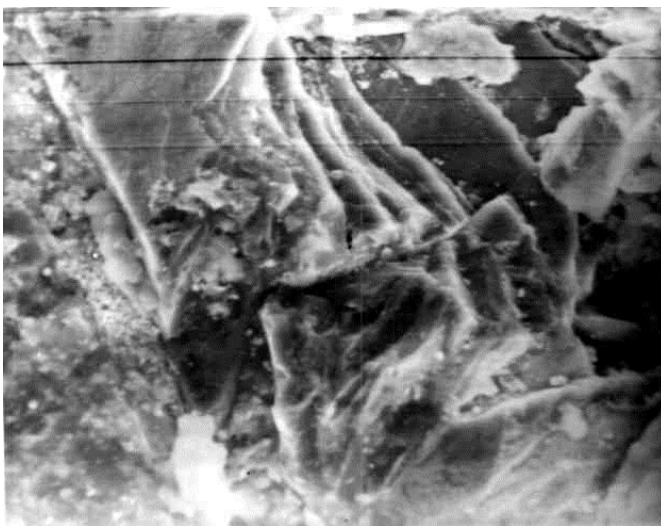
a – разновысотность выступания;

б – активное выступание зерна над уровнем связки.

Условия шлифования: АИШ; $V = 25$ м/сек; $P_n = 1,2$ МПа; $f = 66$ кГц;
круг 12A2-45°AC6-160/125 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6



a



б

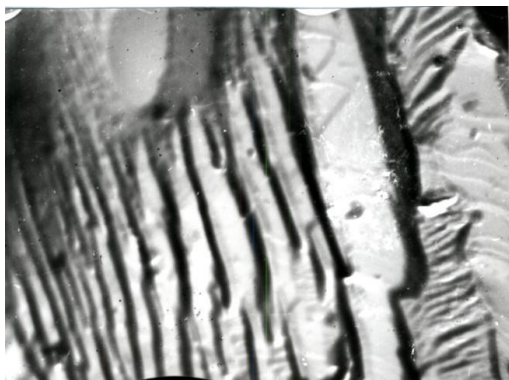
Рисунок 2.12 – Хрупкое разрушение и активное состояние режущих кромок поверхности алмазных зёрен.

Условия шлифования: АИШ; $V = 35$ м/сек; $P_n = 1,2$ МПа; $f = 66$ кГц; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6

Представляет интерес анализ поверхности алмазных зёрен после усталостного характера износа. При больших значениях энергии единичных разрядов ($f = 22$ кГц), когда они воздействуют на поверхность режущей кромки, и при жёстких условиях шлифования на зерне образуются развитые трещины. Такое действие разряда особенно может проявиться, если поверхность самого зерна будет покрыта продуктами шлифования, периодически контактирующими со связкой. В этом случае проявится накопившаяся усталость, которая выразится в усталостном износе алмазного зерна, а импульсный разряд способствует проявлению отмеченного усталостного характера износа.



a



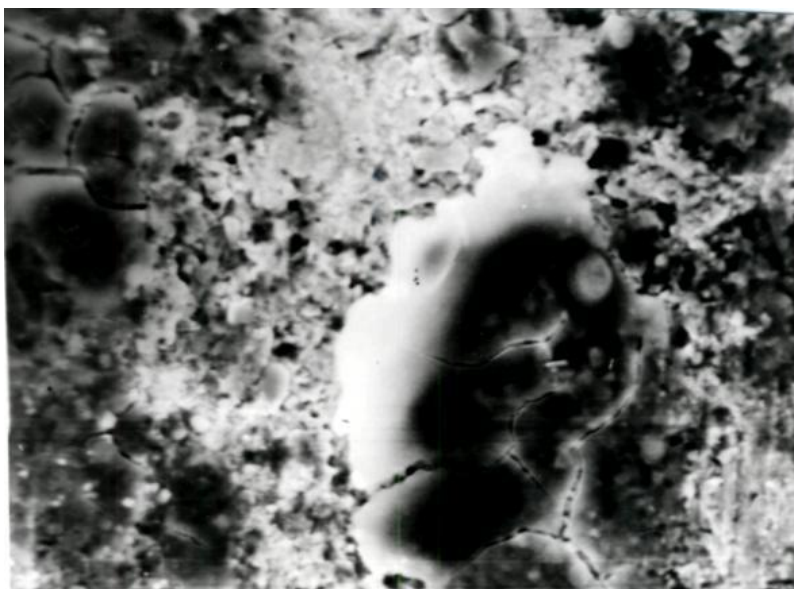
б

Рисунок 2.13 – Субмикрорельеф и ступени скола на поверхности алмазных зёрен:

a – образующийся микрорельеф; *б* – ступени скола на поверхности зерна.

Условия шлифования: АИШ; $V = 25$ м/сек; $P_{\text{н}} = 1,2$ МПа; $f = 66$ кГц; круг 12A2-45°AC6-160/125 M1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6

На рис. 2.14 показаны поверхности вершин алмазных зёрен в результате последствия разряда; отчетливо видны микротрещины, которые впоследствии будут способствовать сколам элементов зёрен, и интенсифицировать их износ и соответственно поверхность алмазного круга. На фотографиях трещины имеют своеобразный характер. В некоторых работах отмечается, что появление, например, кольцевых трещин на поверхности алмаза является следствием того, что алмаз подвергается многократным воздействиям волн напряжений [39]. Кольцевые трещины хорошо видны на отдельных участках поверхности алмазных зёрен (рис. 2.14 *a*) после длительного процесса АИШ (многочисленных контактов с твёрдым сплавом). Кольцевой характер приобретают и новые микротрещины, которые начинают распространяться от уже образованных (рис. 2.14 *б, в*).



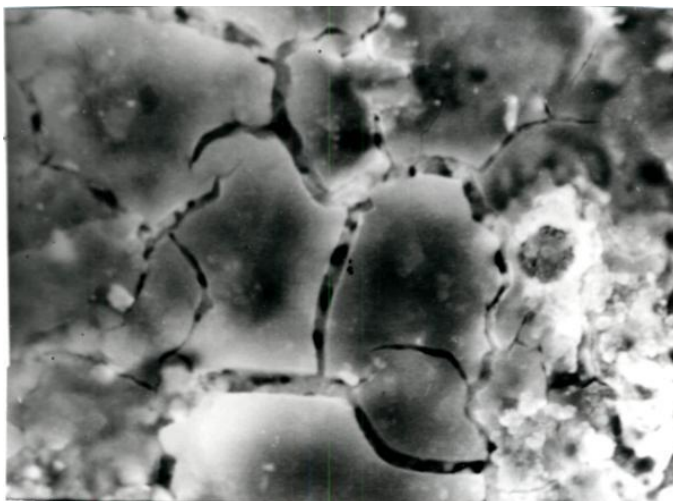
a

Рисунок 2.14 – Усталостный характер износа:

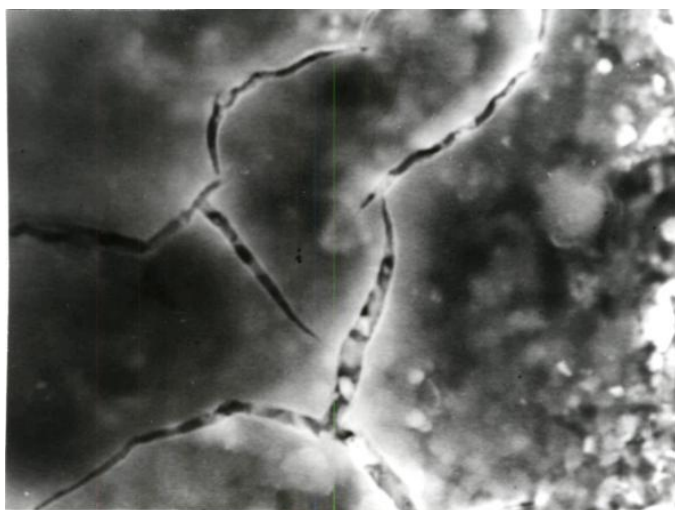
a – поверхность зерна после действия разряда;

б, в – распространение кольцевых трещин.

Условия шлифования: АИШ; $V = 35$ м/сек ; $P_n = 2$ МПа ; $f = 22$ кГц;
 круг 12A2-45°АС6-200/160 М1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6
 (начало)



б



в

Рисунок 2.14 – Усталостный характер износа:

а – поверхность зерна после действия разряда;

б, в – распространение кольцевых трещин.

Условия шлифования: АИШ; $V = 35$ м/сек ; $P_n = 2$ МПа ; $f = 22$ кГц;
круг 12A2-45°АС6-200/160 М1-01-4; обрабатываемый материал Т15К6
(конец)

Такой характер износа алмазных зёрен и поверхности кругов проявляется при достаточно жёстких условиях шлифования.

В заключение следует отметить, что не представляется возможным сделать однозначный вывод о преимущественных характерных особенностях износа алмазных зёрен и рабочей поверхности кругов при АИШ с применением технологии минимальной смазки в виде ТСМ. Виды и характер износа определяются конкретными условиями взаимодействия с обрабатываемым материалом различных участков и кромок алмазного круга и зерна; отмеченные и приведенные выше результаты последствия контакта режущего рельефа с обрабатываемым материалом имеют место в рассматриваемом процессе шлифования.

Выводы

1. Сравнительный анализ различных диэлектрических сред показал, что при АИШ твёрдых сплавов наиболее целесообразно использовать в качестве твёрдого смазочного материала смесь равных частей стеарина и себадиновой кислоты; при этом при большей производительности обеспечиваются сравнительно меньшие значения удельной себестоимости шлифования и относительного расхода алмазов.

2. Установлены оптимальные электрические параметры процесса АИШ, обеспечивающие высокую работоспособность алмазных кругов с применением ТСМ при наименьших затратах: частота импульсов $f = 66$ кГц; энергия единичного разряда $W = 15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж; скважность $n_{\text{скв}} = 2$; время единичного импульса $\tau = 7,6$ мкс.

3. В зависимости от режимов шлифования и характеристик кругов изучены особенности взаимодействия режущей поверхности алмазных кругов с обрабатываемыми твёрдыми сплавами с применением СОТС поливом и ТСМ. На основе анализа коэффициентов шлифования показано, что значения $K_{\text{ш}}$ при шлифовании с ТСМ меньше, чем при обычном шлифовании с СОТС поливом, а значит меньше и напряжённость процесса.

4. Показано, что энергоёмкость процесса АИШ с применением ТСМ меньше, чем при использовании СОТС поливом; это объясняется специфическим механизмом воздействия смазочной среды на адсорбированные поверхности материала, способствуя проявлению эффекта Ребиндера; иницирование адсорбционных эффектов вызывает понижение свободной поверхностной энергии и соответственно уменьшение хрупкой прочности и работы диспергирования.

5. Анализ микрофотографий режущей поверхности алмазных кругов после электронно-микроскопических исследований позволяет заключить, что различные участки рельефа и алмазных зёрен подвержены различным видам воздействия и износа: режущая поверхность развита; разновысотность

алмазных зёрен обеспечивается; обнаруживаются хрупкие разрушения, скалывание отдельных элементов, усталостный характер износа; можно заключить, что режущий рельеф алмазного круга при АИШ с ТСМ не обнаруживает системного характера износа.

Глава 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ АИШ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ

В мире не происходит ничего,
в чем бы не был смысл какого-
нибудь максимума или минимума.
Л.Эйлер

Существует лишь то, что можно
измерить

Макс Планк

Работоспособность алмазных кругов определяется эффективностью реализации их режущих свойств в процессе шлифования и характеризуется объемом материала, снятого с обрабатываемой поверхности в единицу времени, износом алмазного круга, экономической эффективностью обработки. Для определения условий АИШ, обеспечивающих наивысшую работоспособность алмазных кругов, необходимо выявить режимы резания и характеристики алмазных кругов, при которых показатели работоспособности соответствуют наибольшей эффективности процесса. Этого можно достичь путём оптимизации процесса шлифования. При этом в качестве одного из основных параметров оптимизации рекомендуется принимать удельную себестоимость обработки, которая является наиболее обобщенным параметром, позволяющим проанализировать процесс шлифования и объяснить физический смысл закономерностей.

3.1 Методика исследований

Эксперименты по оценке работоспособности алмазных кругов проводились по упругой схеме шлифования, которая позволяет наиболее достоверно выявлять их потенциальные режущие свойства. При шлифовании по жёсткой схеме с принудительной поперечной подачей задаваемый съём материала (производительность) одинаковый, но возможности алмазных кругов могут существенно отличаться, что будет выражаться в различной степени их износа.

Для реализации упругой схемы применялось специальное приспособление, которое обеспечивало упругий контакт режущей поверхности алмазного круга и обрабатываемого твёрдого сплава. Схематическое изображение приспособления представлено на рис. 3.1. В нём реализуется гидравлическое силопередающее устройство. В массивный корпус запрессованы три плунжерные пары, которые соединены специально сделанными каналами; В этих каналах находится масло. К вертикально

расположенному плунжеру подведен стержень, на который устанавливается груз, с помощью которого задается усилие прижима P_y .

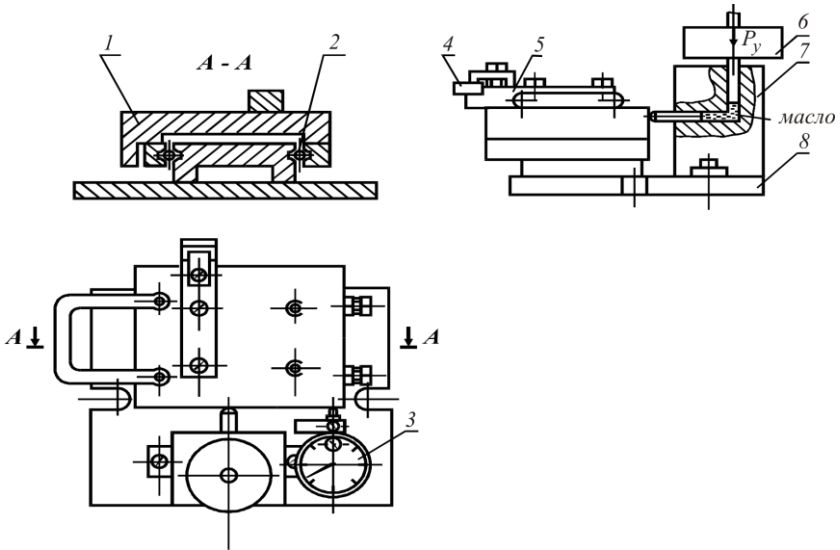


Рисунок 3.1 – Приспособление для оценки режущей способности алмазных кругов по упругой схеме шлифования:

- 1 – каретка; 2 – направляющие качения; 3 – индикатор; 4 – образец;
- 5 – державка; 6 – груз; 7 – силопередающее устройство; 8 – основание

Плунжер, расположенный горизонтально, передает это усилие на небольшую платформу (каретку), которая может перемещаться горизонтально; третий плунжер выполняет двойную функцию – за счёт винтовой пары обеспечивает возможность точных осевых перемещений каретки и служит для компенсации потерь масла через зазоры. Державка со шлифуемой твёрдосплавной пластинкой определённой формы закрепляется на подвижной каретке. При необходимости оценки коэффициентов шлифования либо энергоёмкости процесса на каретку устанавливается динамометр с целью определения тангенциальной составляющей силы резания P_z . Каретка перемещается на специальных шариковых направляющих качения. Они изготовлены таким образом, что за счёт регулируемого при необходимости бокового смещения каретки обеспечивается возможность компенсации износа контактирующих элементов на беговой дорожке; это позволяет предотвратить возможные вибрации при шлифовании.

Перемещение подвижной каретки в направлении торца чашечного алмазного круга, вызванное съёмом твёрдого сплава при шлифовании, периодически определяется с помощью индикатора часового типа с точностью до 0,01 мм; это перемещение принимается соответствующим линейному съёму обрабатываемого материала. Описанное приспособление смонтировано на небольшой плите, с помощью которой осуществляется его крепление на столе станка.

Экспериментальные исследования работоспособности алмазных кругов проводились на универсально-заточном станке модели ЗД642Е. Для обеспечения условий шлифования с введением дополнительной энергии в зону резания, т.е. для реализации процесса АИШ станок был модернизирован; модернизация, в основном, касалась шпиндельного узла. Она заключалась в изоляции алмазного круга на токопроводящей металлической связке от корпуса станка и установке токопроводящих устройств (токосъёмника) на кожухе шлифовального круга. Общий вид установки для экспериментальных исследований показан на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Модернизированный универсально-заточной станок мод. ЗД642Е

Для электроизоляции алмазного круга от шпинделя шлифовальной бабки на посадочный диаметр оправки насаживалась и с помощью эпоксидного клея холодного отверждения закреплялась текстолитовая втулка, которая

является хорошим изолятором. На текстолитовую втулку устанавливался алмазный круг. На втулку напрессовывалось специальное токопроводное медное кольцо, оно плотно контактировало своей торцевой поверхностью с металлическим корпусом алмазного круга на металлической связке (рис. 3.3). Подача импульсного тока в зону шлифования осуществлялась через графитовую щетку, закреплённую в специальной оправке на кожухе алмазного круга; щётка с помощью пружины прижимается к медному кольцу. При этом реализуется возможность подключения одного полюса генератора к щетке и соответственно к алмазному кругу, а другого – к обрабатываемой твёрдосплавной пластинке (детали), которая закрепляется в описанном выше приспособлении на столе станка; приспособление, естественно, также изолировано от станка.

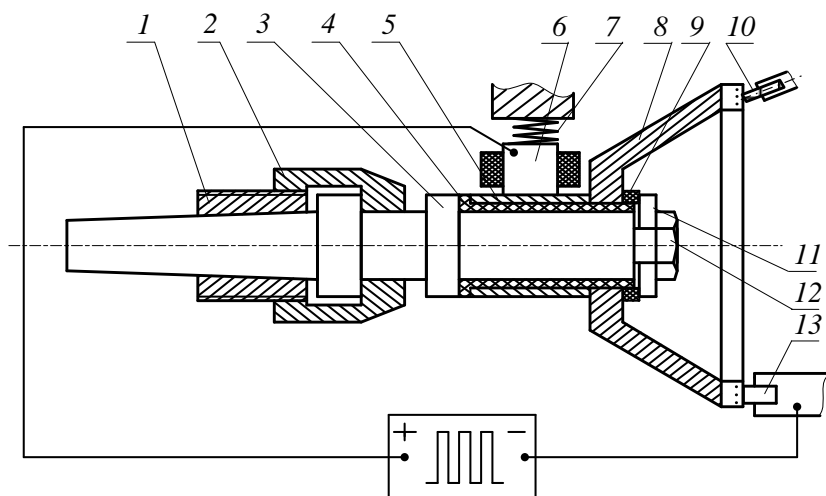


Рисунок 3.3 – Схема модернизации станка для АИШ:

- 1 – шпиндель; 2 – гайка; 3 – оправка; 4 – диэлектрическая втулка;
- 5 – токосъёмное кольцо; 6 – угольный электрод; 7 – пружина;
- 8 – алмазный круг; 9 – текстолитовая шайба; 10 – сухая твёрдая смазка;
- 11 – стальная шайба; 12 – болт крепёжный; 13 – обрабатываемая деталь

Реализация технологии минимальной смазки обеспечивалась применением твёрдого смазочного материала (ТСМ) на основе углеводородной и карбоксидной групп; использовалась стеариновая кислота (стеарин) и кислота себациновая. Подобранный определённый состав смеси этих материалов, описанный ранее, в виде столбика постоянного сечения, расположенного в металлической трубке, постоянно прижимается с усилием до 5 г и находится в контакте с режущей поверхностью алмазного круга

(см. рис. 3.3). Сухая твёрдая смазка, подобранная с учётом температуры каплепадения, является хорошей диэлектрической средой, способствует иницированию электрических разрядов, что очень важно для обеспечения развитости режущего рельефа алмазного круга и поддержания условий его устойчивости, сохранения стабильных условий взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Алмазно-искровое шлифование проводилось с обратной полярностью (круг – анод, обрабатываемый материал – катод); введение дополнительной энергии в зону обработки таким способом обеспечивает лучшую самозатачиваемость алмазного круга, а на обрабатываемый твёрдый сплав воздействует меньшая энергия электрических разрядов. Это имеет практическое значение, так как многофазные твёрдые сплавы склонны к образованию трещин при шлифовании.

В качестве источника питания использовался специальный генератор импульсов НО6506, преобразующий переменный ток напряжением 380 В в униполярный импульсный с регулируемой по необходимости частотой и величиной тока. Следует отметить, что ранее обычно для электроэрозионных процессов применялся как источник питания широкодиапазонный генератор импульсов модели ШГИ-40-440. Этот генератор имеет повышенную сложность конструкции, большие габаритные размеры и функционально он не рассчитан на длительный режим с короткими замыканиями. Указанный генератор не предназначался для использования в процессе шлифования; его конструкция разрабатывалась для эксплуатации вместе с электроэрозионными станками и имеет довольно сложные узлы управления движением электрода-инструмента, а также блок защиты от короткого замыкания.

Разработанный в институте «Укроргстанкинпром» генератор импульсов НО6506 имеет более простую конструкцию и значительно меньшие габариты (400×450×700), более удобен в эксплуатации; у него меньший диапазон регулирования выходных электрических параметров, что полностью удовлетворяет различным условиям алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов (рис. 3.4).

Эксперименты проводились при среднем значении тока от 4 до 6А, напряжение холостого хода – 60...80В, скважность – 2 при частоте импульсов 66 кГц. Скорость шлифования изменялась при помощи сменных шкивов в диапазоне от 15 до 35 м/с; нормальное давление при шлифовании по упругой схеме варьировалось в интервале от 0,8 до 1,6 МПа. В процессе исследований применялись алмазные круги чашечной формы 12А2-45°(150×10×3×32) производства Полтавского алмазного завода на металлической связке М1-01. Во всех кругах прочность зёрен соответствовала марке АС6; диапазон зернистости составлял от 50/40 до 160/125; концентрация алмазов в кругах для каждой зернистости изменялась от 2 до 6. Перед каждым экспериментом алмазные круги устанавливались с биением до 0,01 мм, после установки

производилось предварительное шлифование для приработки рабочей поверхности и подготовки к проведению опыта. В качестве базового обрабатываемого материала использовались твёрдосплавные режущие пластинки Т15К6 формы 0227.

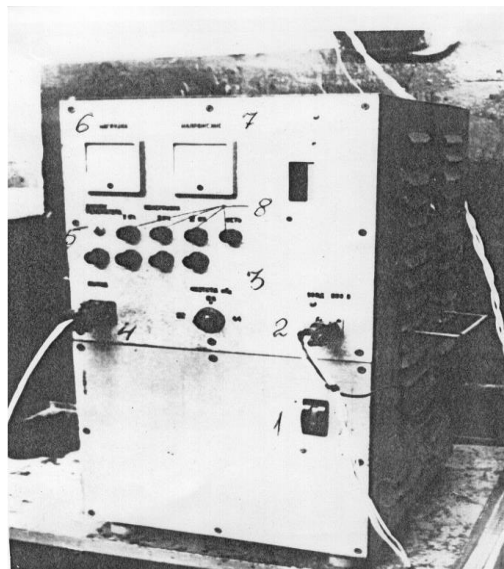


Рисунок 3.4 – Общий вид специального генератора импульсов НО6506:
1 – автоматический выключатель; 2 – клеммы входа; 3 – ручка регулировки частоты; 4 – клеммы выхода; 5 – кнопка пуска генератора; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – сигнальные лампы

Оценка износа алмазных кругов производилась через два часа после окончания очередного опыта, что способствовало выравниванию температур окружающей среды и рабочей поверхности круга. Для измерения износа круга применялось специальное приспособление; схема измерения представлена на рис. 3.5.

На текстолитовый круг по окружности, соответствующей окружности алмазонасного кольца круга, с помощью эпоксидного клея закреплены твёрдосплавные пластинки; они были прошлифованы, а затем доведены в одной плоскости на плоскошлифовальном станке. В текстолитовом диске по центру оси в подготовленном отверстии устанавливается индикатор часового типа с ценой деления 0,001 мм, который закрепляется в приспособлении с помощью винта. Износ круга измерялся следующим образом. В контакт с рабочей поверхностью алмазного круга вводились закреплённые по

окружности текстолитового диска шлифованные твёрдосплавные пластинки; установка диска до и после эксперимента производилась по риске, при этом ножка индикатора упирается в торец доведенной головки крепёжного болта алмазного круга; так поверхность торца болта служит базой для измерения размерного износа круга, который определялся после трёх повторных отсчетов до и после проведения экспериментов.

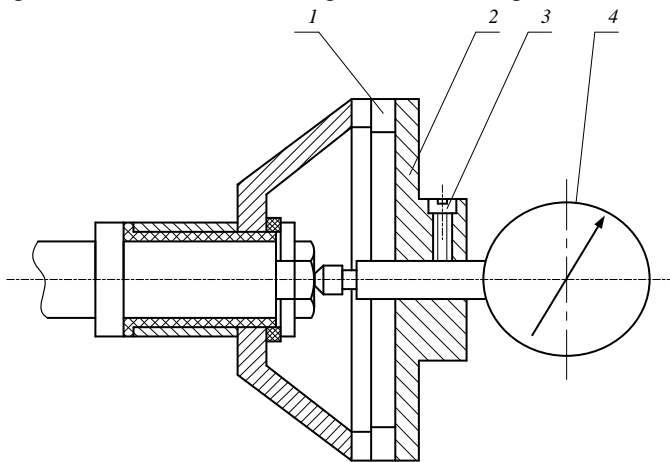


Рисунок 3.5 – Приспособление для измерения износа круга:
 1 – пластинки из твердого сплава; 2 – корпус; 3 – винт;
 4 – индикатор часового типа

Работоспособность алмазных кругов оценивалась по трем критериям: производительность шлифования Q , $\text{мм}^3/\text{мин}$; относительный расход алмазов q , мг/г ; удельная себестоимость обработки $C_{\text{ш}}$, коп/см^3 .

Производительность процесса и относительный расход алмазов характеризуют свойства круга, его потенциальные возможности в соответствующем процессе шлифования, особенно при проведении экспериментов по упругой схеме взаимодействия обрабатываемого материала с кругом. Удельная себестоимость шлифования также является одним из важных параметров оценки процесса обработки, который учитывает в стоимостном выражении как производительность процесса, так и возмещение износа алмазного круга.

В процессе эксперимента определялся линейный съём твёрдосплавной пластинки и объём снятого материала за определённый период времени.

Производительность процесса шлифования Q , $\text{мм}^3/\text{мин}$, определялась из соотношения

$$Q = \frac{F\Delta h}{T}, \quad (3.1)$$

где F – площадь поперечного сечения шлифуемой твёрдосплавной пластинки;
 Δh – линейный съём материала;
 T – время шлифования.

Расчёт относительного расхода алмазов производился следующим образом. Количество израсходованных алмазов для круга чашечной формы любой концентрации B_a , мг, за один час работы подсчитывалось по формуле

$$B_a = \frac{878(D_1^2 - D_2^2)\pi k \Delta s}{4 \cdot 10^5}, \quad (3.2)$$

где D_1 – наружный диаметр алмазоносного кольца, мм;

D_2 – внутренний диаметр алмазоносного кольца, мм;

k – концентрация зёрен в круге;

Δs – линейный износ алмазного круга по толщине, мм.

Количество снятого твёрдого сплава B_m за то же время работы определялось из выражения

$$B_m = \frac{F\Delta h\rho}{10^6}, \quad (3.3)$$

где F – площадь поперечного сечения шлифуемой пластинки, мм²;

Δh – линейный съём твёрдого сплава, мм;

ρ – плотность материала обрабатываемого твёрдого сплава, кг/м³.

Относительный расход алмазов определялся по соотношению изношенных алмазов и массы сошлифованного материала:

$$q = \frac{B_a}{B_m} = \frac{878 \cdot 10^3 \cdot \pi (D_1^2 - D_2^2) k \Delta s}{4 F \Delta h \rho}. \quad (3.4)$$

Для оценки удельной себестоимости шлифования необходимо учитывать совместное влияние производительности обработки, относительного расхода алмазов и общих затрат, связанных с процессом обработки. Суммарная себестоимость шлифования $C_{ш}$ найдется из соотношения [40]

$$C_{ш} = \frac{30 + A + P_r + \Xi + И}{v}, \quad (3.5)$$

где 30 – часовая заработная плата рабочего-шлифовщика, коп/ч;

A – амортизационные отчисления, коп/ч;

P_r – затраты на текущий ремонт станка, приведенные к 1 часу работы, коп/ч;

Ξ – затраты на электроэнергию, коп/ч;

И – затраты, связанные с возмещением износа алмазного круга с учётом его стоимости, приведенные к 1 часу работы, коп/ч;

v – объём сошлифованного, в расчёте на 1 час работы, материала, $\text{см}^3/\text{г}$.

Удельная себестоимость шлифования, как видно из выражения (3.5), в большой степени определяется съёмом материала (производительностью) и износом алмазного круга.

3.2 Планируемый эксперимент и его условия

Работоспособность кругов изучалась с применением методики многофакторного планирования экспериментов, которая позволяет описать процесс в виде уравнений регрессии и получить математические модели параметров оптимизации. При этом необходимо правильно оценить область изменения независимых переменных, соответствующую близким к оптимальным значениям исследуемого параметра оптимизации. Это позволяет правильно выбрать интервалы варьирования факторов, т.е. определить наиболее рациональный диапазон условий практического применения алмазных кругов.

Интервалы варьирования факторов выбирались в диапазоне условий шлифования, обеспечивающих наименьшие значения относительного расхода алмазов и удельной себестоимости обработки.

Исследование факторного пространства, прилежащего к оптимуму, производилось с помощью планирования второго порядка, т.к. линейное уравнение регрессии не может адекватно описывать поверхность отклика из-за крутизны гиперплоскостей факторного пространства и возможной значимости эффектов взаимодействия факторов и квадратичных эффектов.

В настоящее время математическая теория планирования экспериментов располагает большим количеством видов планов, а, следовательно, и возможных матриц планирования. Поэтому большое значение приобретает выбор плана, наиболее подходящего для конкретных решаемых задач. Из наиболее широко применяемых в настоящее время планов экспериментов второго порядка можно отметить следующие: ортогональные, рототабельные и планы, близкие к так называемым Д-оптимальным планам. Использование ортогональных и рототабельных планов при исследовании работоспособности шлифовальных кругов связано с определёнными трудностями, так как часто бывает невозможно реализовать уровни факторов варьирования для дискретных значений факторов (например, концентрация алмазного круга, зернистость и др.), количественное значение которых может оказаться дробным (например, 1,25 или 1,63).

Таким образом, можно отметить, что наибольший интерес при исследовании шлифования алмазными кругами представляют планы, близкие к Д-оптимальным, построенные на кубе, поскольку в данном случае факторы варьировались только на трёх уровнях, причем верхний и нижний уровни

симметричны относительно центра плана и имеют целочисленные значения. Таким образом, предпочтение было отдано плану, близкому к Д-оптимальному и обозначаемому в литературе как B_4 [41, 42] для четырёх факторов: нормальное давление P , скорость резания V , зернистость Z и концентрация k .

Реализация плана B_4 позволяет получить математическую модель параметра оптимизации в виде уравнения регрессии для удельного расхода алмазов. В общем случае поверхность отклика описывается полным уравнением второго порядка [42]

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (3.6)$$

где \hat{y} – выборочная оценка изучаемой функции;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – выборочные коэффициенты регрессии (оценка для генеральных значений коэффициентов регрессии $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$);

x_i, x_j – независимые переменные;

k – общее число независимых переменных.

Гипотеза об адекватности (пригодности) модели проверялась по критерию Фишера [43]

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}, \quad (3.7)$$

где $S_{ад}^2$ – остаточная дисперсия или дисперсия адекватности;

$S^2\{y\}$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$ рассчитывалась по формуле [43]

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - \lambda}, \quad (3.8)$$

где \bar{y}_u – среднее значение одного наблюдения;

\hat{y}_u – расчётное значение критерия по уравнению регрессии;

n – число повторений данного опыта;

N – общее число опытов (число строк матрицы);

λ – число коэффициентов уравнения.

Дисперсия воспроизводимости определяется из выражения [43]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}, \quad (3.9)$$

где N – общее число опытов;
 n – число повторений данного опыта;
 y_{ij} – результаты отдельного наблюдения;
 \bar{y}_u – среднее арифметическое значение критерия.

Найденное из уравнения (3.7) значение F сравнивалось с табличным. Если $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, то с выбранной доверительной вероятностью уравнение считалось адекватным, в противном случае модель неадекватна.

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялось для оценки влияния отдельных факторов на параметры оптимизации.

Для того, чтобы не вызывать искажения модели, отсеивались незначимых факторов не производился.

С целью уменьшения ошибок экспериментов проводилась проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена G [41]

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S_i^2}, \quad (3.10)$$

где S_{\max}^2 – максимальная дисперсия;

S_i^2 – дисперсия опыта;

N – число опытов (количество дисперсий).

Дисперсии однородны, если экспериментальное значение критерия Кохрена не превышает табличного.

Дисперсия каждой горизонтальной строки матрицы (ошибки опыта) S_i^2 определялась из соотношения [43]

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{n - 1}, \quad (3.11)$$

где y_{iu} – значение критерия оптимизации для отдельного наблюдения;

\bar{y}_u – среднее арифметическое значение критерия (результат отдельного опыта);

n – число наблюдений (повторений опыта).

После нахождения адекватных математических моделей процесса находилась оптимальная область параметров оптимизации, что удобно осуществлять с помощью канонических преобразований. Последнее позволяет получить графическую и аналитическую интерпретацию области оптимума. Каноническое преобразование исходного уравнения регрессии второго порядка заключается в переходе к стандартному уравнению, содержащему только квадратичные члены [44, 45]

$$y_u - y_s = \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2, \quad (3.12)$$

где y_u, y_s – значение выходной переменной (y_s – в новом начале координат);

B_{ii} – коэффициенты канонического уравнения;

X_i – канонические переменные;

k – количество факторов.

Получение нового уравнения осуществлялось переносом начала координат в центр поверхности отклика и поворотом осей на некоторый угол. При этом линейные члены и свободный член уравнения устраняются переносом начала координат, а взаимодействие факторов исключается поворотом осей.

Начало координат канонического уравнения совпадает с центром поверхности отклика и вычисляется решением системы уравнений, состоящей из частных производных, которые приравниваются к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial X_2} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial y}{\partial X_k} = 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

Канонические коэффициенты B_{ij} определялись решением характеристического детерминанта, приравняемого нулю [46]:

$$\begin{vmatrix} (b_{11} - B) & 0,5b_{12} & 0,5b_{13} & K & 0,5b_{1k} \\ 0,5b_{21} & (b_{22} - B) & 0,5b_{23} & K & 0,5b_{2k} \\ 0,5b_{31} & 0,5b_{32} & (b_{33} - B) & K & 0,5b_{3k} \\ M & M & M & K & M \\ 0,5b_{k1} & 0,5b_{k2} & 0,5b_{k3} & K & (b_{kk} - B) \end{vmatrix} = 0. \quad (3.14)$$

Проверка правильности решения осуществлялась с помощью зависимости [46]

$$\sum_{i=1}^n B_{ii} = \sum_{i=1}^n b_{ii}. \quad (3.15)$$

Угол поворота осей нового центра координат определялся из соотношений [48]

$$\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{B_{ii} - b_{ij}}{b_i}, \quad (3.16)$$

где α – угол поворота осей;

b_i , b_{ii} , b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии.

После проведения канонических преобразований анализ поверхности отклика осуществляли с помощью двумерных сечений. Для анализа влияния отдельных факторов на показатели работоспособности кругов строились однофакторные зависимости. Результаты экспериментов обрабатывались по стандартной программе MS Excel «Многофакторный регрессионный анализ».

3.3 Анализ работоспособности алмазных кругов

Исследование работоспособности алмазных кругов при алмазно-искровом шлифовании твёрдого сплава с применением твёрдого смазочного материала проводилось в зоне скоростей и давлений, обеспечивающих высокое качество обработанной поверхности и приемлемые значения удельной себестоимости обработки. Были выбраны следующие интервалы изменения режимов: скорость резания от 20 до 30 м/с; давление от 0,8 до 1,6 МПа. Значения факторов, уровней и интервалов их варьирования для планируемого эксперимента второго порядка по плану V_4 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Обозначение факторов, уровни и интервалы их варьирования при алмазно-искровом шлифовании твёрдого сплава с применением ТСМ

Факторы	Давление P_n , МПа	Скорость шлифования V_s , м/с	Зернистость Z , мкм	Концентрация k , %
	x_1	x_2	x_3	x_4
Нулевой уровень (0)	1,2	25	120 (100/80)	4 (100)
Верхний уровень (+)	1,6	30	200 (160/125)	6 (150)
Нижний уровень (-)	0,8	20	40 (50/40)	2 (50)
Интервал варьирования	0,4	5	80	2 (50)

Матрица планирования и результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица планирования и результаты экспериментов при АИШ твёрдого сплава Т15К6 с применением технологии минимальной смазки

№№ опытов	Факторы				Значения параметров оптимизации		
	x_1	x_2	x_3	x_4	\bar{Q} , мм ³ /мин	\bar{q} , мг/г	\bar{C} , коп/см ³
1	–	–	–	–	542,2	1,17	78,94
2	–	–	–	+	884,6	5,46	122,93
3	–	–	+	–	637,3	1,61	92,65
4	–	–	+	+	575,7	1,85	64,69
5	–	+	–	–	672,4	1,68	93,90
6	–	+	–	+	903,8	3,41	83,42
7	–	+	+	–	485,7	1,17	82,88
8	–	+	+	+	492,8	2,08	74,10
9	+	–	–	–	982,3	1,33	89,15
10	+	–	–	+	1190,5	4,22	94,62
11	+	–	+	–	1126,4	1,18	63,43
12	+	–	+	+	863,5	1,59	49,82
13	+	+	–	–	971,0	1,52	82,34
14	+	+	–	+	1420,2	3,33	74,82
15	+	+	+	–	917,1	0,91	55,82
16	+	+	+	+	956,5	2,71	69,26
17	+	0	0	0	1090,8	0,74	33,78
18	–	0	0	0	614,7	1,41	62,00
19	0	+	0	0	801,9	1,07	44,26
20	0	–	0	0	770,6	0,91	47,31
21	0	0	+	0	713,4	2,28	79,48
22	0	0	–	0	976,3	2,47	77,86
23	0	0	0	+	996,7	2,61	66,39
24	0	0	0	–	658,5	0,86	61,02

Коэффициенты полинома (уравнения регрессии) рассчитывались, как отмечалось, по стандартной программе MS Excel «Многофакторный

регрессионный анализ». После расчетов коэффициентов получены следующие уравнения регрессии:

а) для производительности

$$y_Q = 820,13 + 206,19x_1 + 2,79x_2 - 98,72x_3 + 71,86x_4 + 11,57x_1x_2 + 7,06x_1x_3 - 5,46x_1x_4 - 44,78x_2x_3 + 31,88x_2x_4 - 94,20x_3x_4 + 32,72x_1^2 - 33,77x_2^2 + 24,82x_3^2 + 7,57x_4^2. \quad (3.17)$$

б) для относительного расхода алмазов

$$y_q = 1,32 - 0,13x_1 - 0,08x_2 - 0,51x_3 + 0,88x_4 + 0,12x_1x_2 + 0,06x_1x_3 - 0,02x_1x_4 + 0,18x_2x_3 - 0,01x_2x_4 - 0,46x_3x_4 - 0,25x_1^2 - 0,34x_2^2 + 1,05x_3^2 + 0,41x_4^2. \quad (3.18)$$

в) для удельной себестоимости обработки

$$y_{C_{ш}} = 52,19 - 7,92x_1 - 2,32x_2 - 9,27x_3 - 0,06x_4 + 0,64x_1x_2 - 2,37x_1x_3 + 0,05x_1x_4 + 3,97x_2x_3 - 1,27x_2x_4 - 4,33x_3x_4 - 4,29x_1^2 - 6,40x_2^2 + 26,49x_3^2 + 11,52x_4^2. \quad (3.19)$$

Найденное из уравнения (3.7) значение F сравнивалось с табличным. Если $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, то с выбранной доверительной вероятностью уравнение считалось адекватным, в противном случае модель неадекватна (табл. 3.3). Табличное значение F -критерия при доверительной вероятности 0,95 составляет 2,4 [49].

Таблица 3.3 – Статистические характеристики уравнений регрессии (3.17...3.19)

Параметры оптимизации	$S_{\text{ал}}^2$	S_y^2	$F_{\text{расч}}$
Q	1592	788	2,02
q	3,27	1,78	1,84
$C_{ш}$	19,31	10,16	1,90

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялась для оценки влияния отдельных факторов на параметры оптимизации. Для того,

чтобы не вызывать искажения модели, отсеб незначимых факторов не проводился.

С целью уменьшения ошибок экспериментов проводилась проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена, которая показала, что расчётные значения этого критерия (табл. 3.4) меньше табличного значения $G_{\text{табл}} = 0,2354$ [43], поэтому дисперсии считались однородными.

Таблица 3.4 – Расчётные значения критерия Кохрена

Исследуемые параметры	Q	q	$C_{\text{ш}}$
Расчётные значения	0,18	0,15	0,19

Канонические преобразования позволяют произвести анализ поверхностей отклика с помощью двумерных сечений. Для исследования влияния изучаемых факторов – нормального давления, скорости шлифования, зернистости и концентрации алмазных кругов на показатели процесса строились однофакторные зависимости.

Двумерные сечения поверхностей отклика – $Q-f(P_n, V)$, $q-f(P_n, V)$, $C_{\text{ш}}-f(P_n, V)$ – позволяют выбирать различные сочетания режимов алмазно-искрового шлифования для получения необходимой производительности и относительного расхода алмазов, сбалансированных с удельной себестоимостью обработки (рис. 3.6 – 3.8; 3.12 – 3.14). Например, производительность в интервале от 650 мм³/мин до 800 мм³/мин можно обеспечить при давлении от 0,8 МПа до 1,2 МПа в широком диапазоне скоростей шлифования, при этом относительный расход алмазов изменяется незначительно, а удельная стоимость шлифования существенно снижается в среднем от 50 коп/см³ до 30 коп/см³.

Варьирование режимами шлифования дает возможность более рационально использовать технологические возможности процесса и оборудования с учетом получения заданной производительности при минимальной удельной себестоимости обработки.

Анализ влияния режимов шлифования и характеристик алмазных кругов на показатели их работоспособности при алмазно-искровом шлифовании с применением технологии минимальной смазки выполнялся с помощью однофакторных зависимостей, представленных на рис. 3.9–3.11; 3.15–3.17, а также приведенных в прил. (рис. А.1–А.36) и соответствующих расчётных таблицах (прил., табл. А.1–А.18).

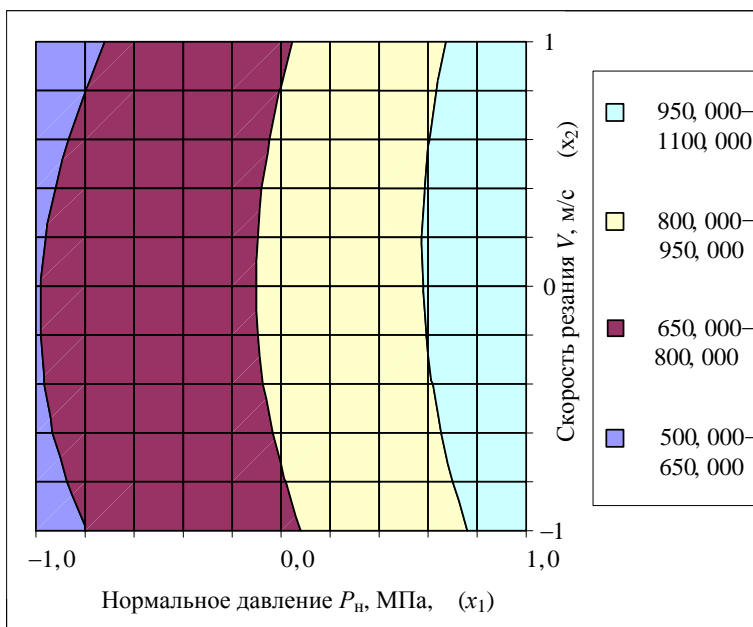


Рисунок 3.6 – Двумерные сечения поверхности отклика $Q-f(P_n, V)$:

$$Z = 120 (100/80); \kappa = 4$$

Значения функции при различных значениях аргумента вычисляли при фиксировании трёх факторов на одном из уровней (чаще нулевом), либо один из факторов устанавливался на нескольких уровнях, тогда, естественно, на графиках изображались несколько соответствующих зависимостей.

Характер расположения линий равного отклика и графиков на представленных рисунках позволяет оценить влияние нормального давления и скорости резания на производительность, относительный расход алмазов и удельную себестоимость обработки. Монотонное увеличение производительности с ростом давления (см. рис. 3.6 – 3.9) вызвано увеличением сечения единичного среза в результате более интенсивного внедрения алмазных зёрен в обрабатываемый материал, а также роста количества реально участвующих в резании зёрен из ниже расположенных уровней залегания. Изменение относительного расхода алмазов не столь значительно по сравнению с увеличением производительности, поэтому экономия от увеличения производительности превышает затраты, связанные с возмещением износа алмазных кругов (относительный расход алмазов и удельная себестоимость с увеличением давления уменьшается (см. рис. 3.11).

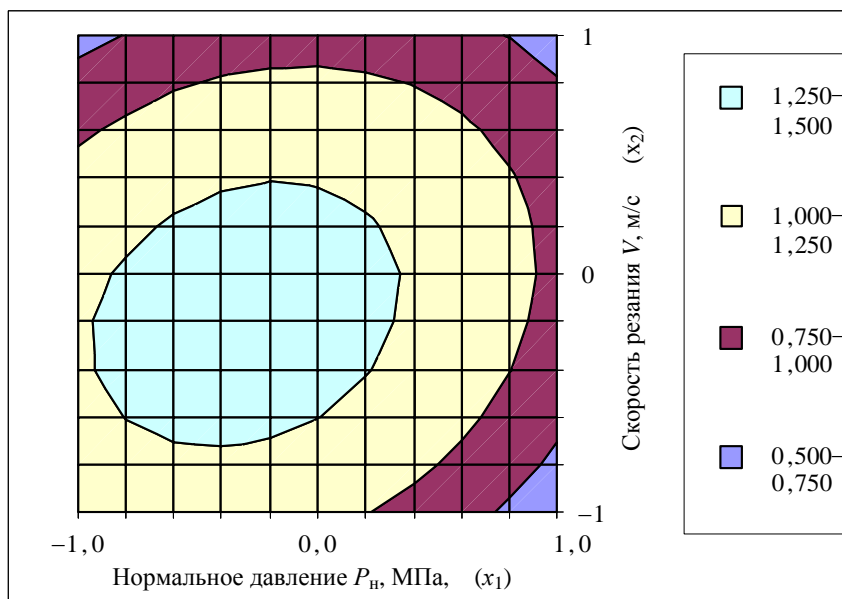


Рисунок 3.7 – Двумерные сечения поверхности отклика $q-f(P_n, V)$;
 $Z = 120 (100/80)$; $\kappa = 4$

Скорость резания неоднозначно влияет на работоспособность алмазных кругов. С одной стороны, с повышением скорости увеличивается число встреч в единицу времени алмазных зёрен с обрабатываемым материалом, что способствует росту суммарного съёма материала, вместе с тем следует отметить, что увеличение скорости ударного воздействия зёрен способствует более интенсивному характеру износа зёрен, уменьшению степени остроты режущих кромок и увеличению их радиуса округления ρ . Следует заметить, что при обычном шлифовании повышение скорости резания способствует самозатачиваемости режущей поверхности, поэтому во многих работах отмечается рост производительности.

При алмазно-искровом шлифовании возобновляемость рельефа, его развитость обеспечивается введением в зону резания энергии в виде электрических разрядов, поэтому фактор скорости резания не столь значим. Кроме того, при больших скоростях уменьшается время воздействия на круг искровых разрядов (разд. 2), несколько ослабляется самозатачиваемость. В результате производительность незначительно изменяется, что и отражается на не столь заметном, как при увеличении давления, снижении удельной себестоимости шлифования $C_{ш}$ (рис. А.26).

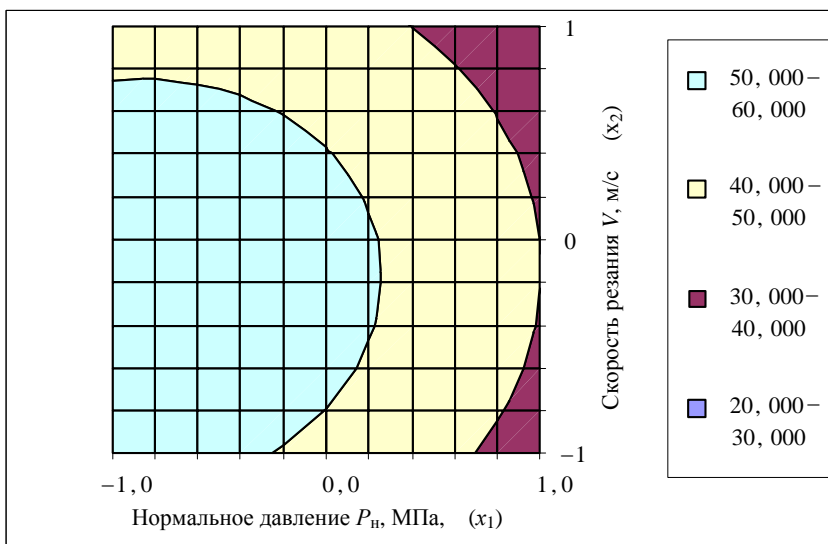


Рисунок 3.8 – Двумерные сечения поверхности отклика $C_{ш} - f(P_n, V)$:

$$Z = 120 (100/80); \kappa = 4$$

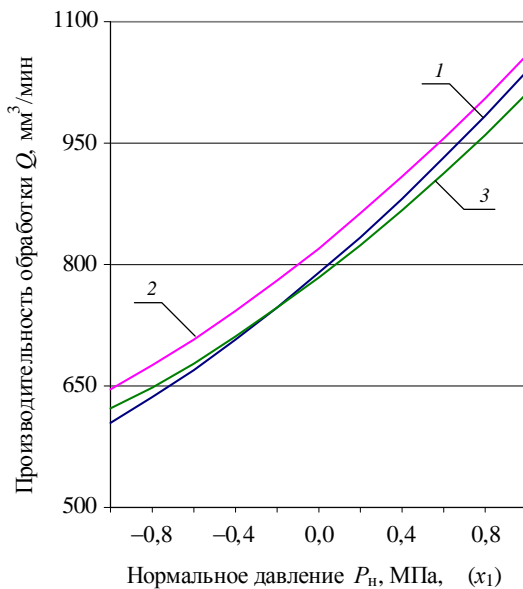


Рисунок 3.9 – Влияние P_n на Q : $Z = 120 (100/80)$; $\kappa = 4$;

$$1 - V = 30 \text{ м/с}, 2 - V = 25 \text{ м/с}, 3 - V = 20 \text{ м/с}$$

Двумерные сечения поверхности отклика $Q-f(Z, \kappa)$, $q-f(Z, \kappa)$, $C_{\text{ш}}-f(Z, \kappa)$, а также соответствующие однофакторные зависимости (см. рис. 3.15–3.17) позволяют выбирать различные сочетания характеристик алмазных кругов для получения необходимой производительности и относительного расхода алмазов с соответствующей рассчитанной удельной себестоимостью шлифования. Характер расположения линий равного отклика, а также однофакторные зависимости свидетельствуют о сложном взаимодействии зернистости и концентрации. Это объясняется особенностями изменения количественного фактора, связанного с числом работающих зёрен. Например, с увеличением зернистости количество работающих зёрен уменьшается, а с увеличением концентрации алмазов в кругах их число возрастает; при этом степень изменения этих факторов различна.

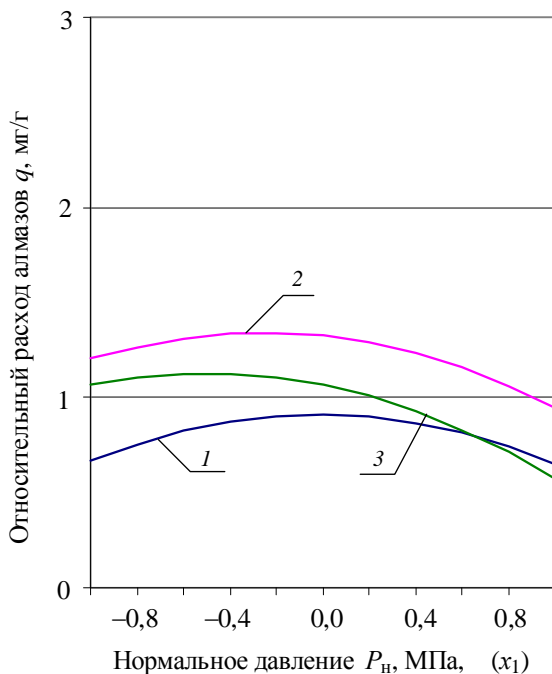


Рисунок 3.10 – Влияние P_n на q : $Z = 120$ (100/80); $\kappa = 4$;
 1 – $V = 30$ м/с, 2 – $V = 25$ м/с, 3 – $V = 20$ м/с

Как следует из приведенных зависимостей, съём твёрдого сплава несколько снижается; увеличивается расстояние между зёрнами и уменьшается их число на рабочей поверхности круга.

Зависимость относительного расхода $q-f(Z)$ имеет экстремальный характер, что вызывает соответствующее изменение удельной себестоимости шлифования, значение которой можно считать оптимальной при зернистости $Z - 180/100$.

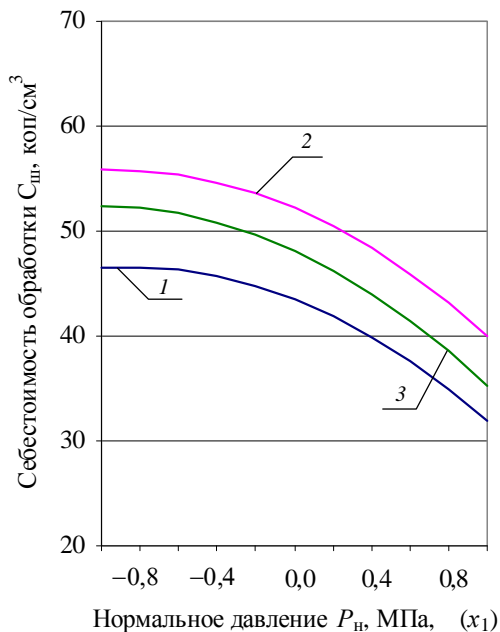


Рисунок 3.11 – Влияние P_n на $C_{ш}$: $Z=120$ (100/80); $\kappa=4$;
 1 – $V=30$ м/с, 2 – $V=25$ м/с, 3 – $V=20$ м/с

Специфическое влияние зернистости круга при алмазно-искровом шлифовании в отличие от обычного шлифования объясняется следующим. В процессе обычного шлифования, когда самозатачиваемость абразивного круга, возобновляемость его режущей способности в процессе работы не обеспечивается, крупнозернистые круги сохраняют развитость более продолжительное время, засаливание в меньшей степени из-за больших межзёренных пространств и большей высоты выступания зёрен; поэтому производительность процесса шлифования с увеличением зернистости повышается.

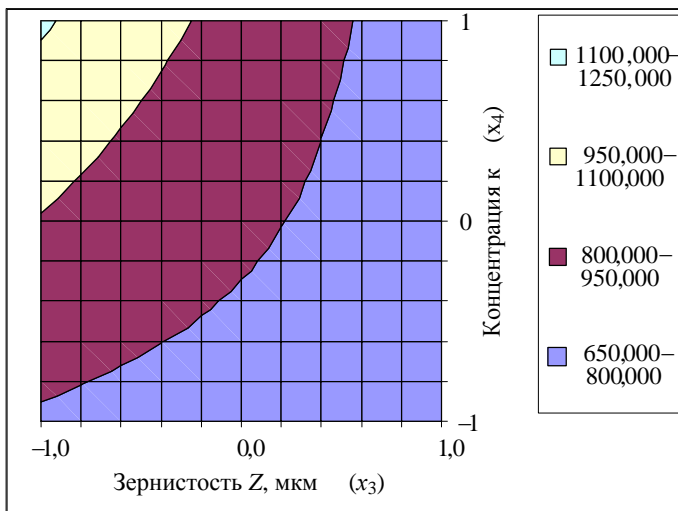


Рисунок 3.12 – Двумерные сечения поверхности отклика $Q-f(Z, \kappa)$:

$$P_H = 1,2 \text{ МПа}; V = 25 \text{ м/с}$$

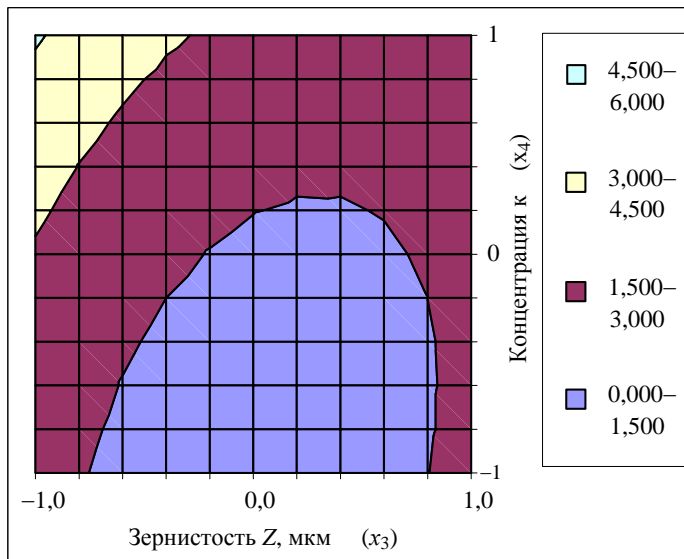


Рисунок 3.13 – Двумерные сечения поверхности отклика $q-f(Z, \kappa)$:

$$P_H = 1,2 \text{ МПа}; V = 25 \text{ м/с}$$

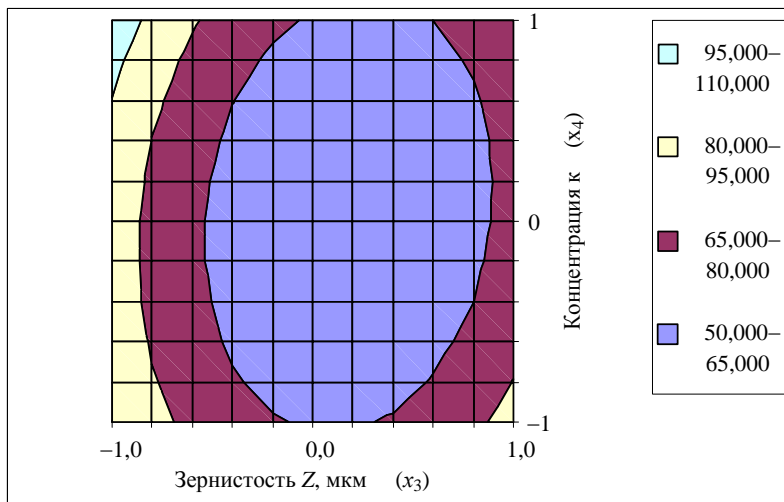


Рисунок 3.14 – Двумерные сечения поверхности отклика $C_{ш} - f(Z, \kappa)$:

$P_H = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с

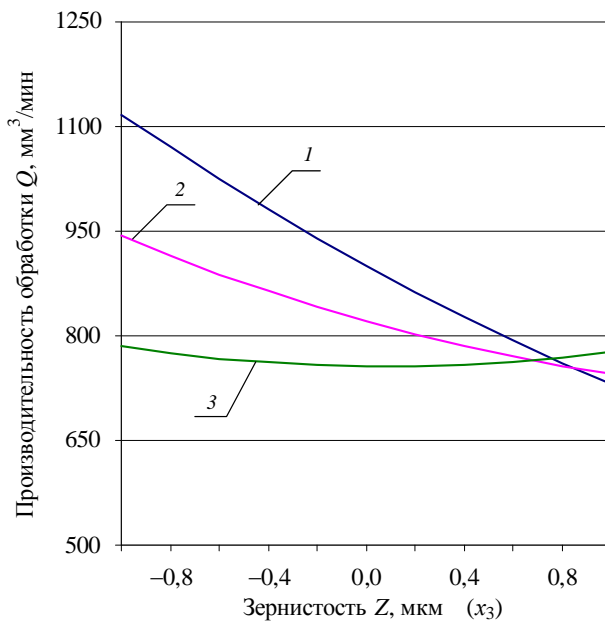


Рисунок 3.15 – Влияние Z на Q : $P_H = 1,2$ МПа, $V = 25$ м/с;

1 – $\kappa = 6$; 2 – $\kappa = 4$; 3 – $\kappa = 2$

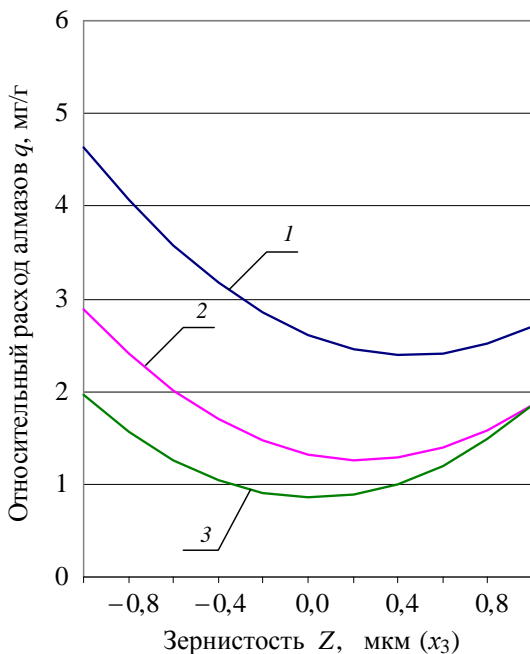


Рисунок 3.16 – Влияние Z на q : $P_{н} = 1,2$ МПа, $V = 25$ м/с;

1 – $\kappa = 6$; 2 – $\kappa = 4$; 3 – $\kappa = 2$

Влияние концентрации на работоспособность алмазных кругов объясняется, главным образом, количественным фактором (числом зёрен). Повышение концентрации алмазов, с одной стороны, приводит к росту количества режущих зёрен, что, естественно, должно способствовать повышению производительности шлифования. С другой стороны, увеличение концентрации ведёт к снижению нагрузки на отдельные зёрна и к её перераспределению в процессе шлифования; в результате уменьшается толщина и площадь единичного среза. Таким образом, взаимное воздействие отмеченных факторов вызывает лишь умеренный рост производительности (рис. А.6). Следует отметить, что с повышением концентрации для интенсификации процесса шлифования целесообразно увеличить нормальную силу, так как только в этом случае можно увеличить толщину среза и реализовать те режущие потенциальные возможности алмазных кругов, которые обусловлены ростом их концентрации. Повышение концентрации увеличивает интенсивность воздействия алмазных зёрен на обрабатываемую поверхность твёрдого тела и уменьшает энергию импульсов

разрядов в процессе шлифования, что было показано ранее (разд. 2). Поэтому невысокий темп роста производительности связан с тем, что, несмотря на преобладающее влияние количественного фактора, режущая способность круга менее интенсивно восстанавливается под воздействием единичных искровых разрядов.

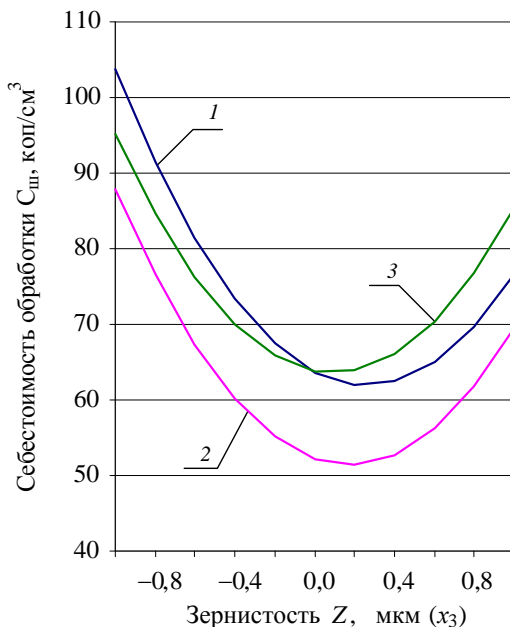


Рисунок 3.17 – Влияние Z на $C_{ш}$: $P_n = 1,2$ МПа, $V = 25$ м/с;

$1 - \kappa = 6$; $2 - \kappa = 4$; $3 - \kappa = 2$

Относительный расход алмазов с увеличением концентрации возрастает (рис. А.18, А.22, А.24). Поэтому зависимость удельной себестоимости шлифования $C_{ш}$ от концентрации характеризуется экстремальной зависимостью с наименьшим значением ее $\kappa = 4$ (100 %).

Анализ работоспособности алмазных кругов при алмазно-искровом шлифовании с применением технологии минимальной смазки позволил определить не только оптимальные условия и установить общие закономерности процесса обработки твёрдых сплавов, но и выявить некоторые его отличительные особенности, к которым можно отнести влияние скорости резания, зернистости и концентрации алмазов на их режущую способность. Если при традиционном алмазном шлифовании увеличение скорости резания и зернистости повышает самозатачиваемость и режущую способность кругов [47, 48–51, 52], то в процессе алмазно-

искрового шлифования их влияние на отмеченные факторы незначительно, так как высокая режущая способность кругов и их активная самозатачиваемость обеспечивается эрозийным воздействием на металлическую связку.

Из полученных результатов исследований работоспособности алмазных кругов можно сделать важное, по нашему мнению, заключение: любые выводы о преимуществе каких-либо условий шлифования и характеристик алмазных кругов могут иметь реальный смысл лишь с учётом соотношения производительности и относительного расхода алмазов, которое выражается удельной себестоимостью шлифования материала.

Выводы

1. Обеспечение развитости режущей поверхности алмазных кругов в процессе шлифования с введением в зону резания дополнительной энергии при использовании технологии минимальной смазки позволяет наиболее полно выявлять показатели работоспособности по удельной себестоимости обработки $C_{ш}$, коп/см³ с учётом производительности Q , мм³/мин и относительного расхода алмазов q , мг/г.

2. Установлены закономерности и отличительные особенности обработки твёрдого сплава – это влияние скорости резания, зернистости и концентрации на показатели работоспособности алмазных кругов. Скорость резания в процессе АИШ незначительно влияет на самозатачиваемость алмазных кругов, так как их высокая режущая способность по определению обеспечивается воздействием электрических разрядов на связку круга; поэтому уменьшение удельной себестоимости шлифования с ростом скорости незначительно по сравнению с влиянием нормального давления.

3. Зависимость показателей работоспособности от характеристик алмазных кругов при АИШ с применением технологии минимальной смазки в виде твёрдого смазочного материала свидетельствует о сложном характере взаимовлияния зернистости и концентрации кругов, которые определяют условия контактного взаимодействия рабочей поверхности с обрабатываемым материалом. С увеличением зернистости (в отличие от обычных процессов шлифования) производительность процесса несколько снижается. Однако экстремальный характер изменения относительного расхода алмазов вносит коррективы в установление оптимального значения зернистости алмазных кругов.

4. Рост концентрации незначительно влияет на повышение производительности, так как режущая способность алмазных кругов высоких концентраций возобновляется менее интенсивно при воздействии разрядов на рельеф круга; экстремальный характер зависимости удельной себестоимости

шлифования от концентрации вызван соответствующим ростом относительного расхода алмазов.

5. Определены оптимальные условия алмазно-искрового шлифования твёрдых сплавов с использованием твёрдого смазочного материала по технологии минимальной смазки, обеспечивающие наименьшую удельную себестоимость обработки: $P_n = 1,6$ МПа, $V = 30$ м/с, $Z = 100/80$, $\kappa = 4$ (100 %).

Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ

В этой жизни определено только то, что нет ничего определённого.

Плиний Старший

Работоспособность инструментов их твёрдых сплавов зависит от качества их обработки – шероховатости шлифованных поверхностей и состояния приповерхностного слоя, характеризуемого остаточным напряжением. В технической литературе имеется достаточно много информации, относящейся к качеству обработанной поверхности шлифованием, как обычными абразивными шлифовальными кругами, так и алмазами, в том числе и при алмазно-искровом шлифовании. Анализ и результаты ряда работ будут представлены ниже; при этом, как известно, шлифование различных материалов производится с применением смазочно-охлаждающих технологических сред струйным поливом. Ранее нами отмечалось, что в последнее время находит применение технология минимальной смазки, которую в некоторых работах считают альтернативой использования СОТС поливом; при этом названная технология с различной эффективностью используется при точении, фрезеровании, сверлении и т.д.

Вместе с тем, следует отметить, что возможность использования технологии минимальной смазки с применением твёрдого смазочного материала в процессе шлифования ранее не рассматривалась и считалась неэффективной.

Нами показано, что применение технологии минимальной смазки для комбинированной обработки твёрдых сплавов алмазными кругами на токопроводящей металлической связке за счёт использования специального смазывающего материала представляется целесообразным. Получен патент на оптимальный состав твёрдого смазывающего материала, представляющего смесь стеарина и себациновой кислоты в соотношении 1:1.

Поэтому в рассматриваемой главе представляет интерес и представляется важным изложение результатов исследований качества поверхности после алмазно-искрового шлифования с применением технологии минимальной смазки.

4.1. Исследование шероховатости поверхности

Поскольку процесс шлифования чаще всего является окончательным процессом обработки, то в большинстве случаев оценки качества используется критерий шероховатости поверхности. Известен ряд работ, посвящённых изучению шероховатости поверхности и режущей кромки

инструментов после алмазной обработки различных материалов, в том числе и твёрдых сплавов [22, 34, 47, 48, 53].

Из методов, известных для определения шероховатости, наиболее достоверными можно считать оценку шероховатости контактным способом с помощью профилографов-профилометров.

В наших исследованиях шероховатости после алмазно-искрового шлифования с применением технологии минимальной смазки использовался современный прибор – профилограф-профилометр SURTRONIC 3+ фирмы TAYLOR-HOBSON (рис. 4.1). С помощью представленного прибора можно оценивать ряд параметров, характеризующих состояние микронеровностей Ra , Rz , Rq , Sm ; нами в качестве основного использовался параметр шероховатости Ra – среднеарифметическая величина неровностей профиля.

В комплект прибора входят:

- непосредственно сам прибор;
- печатающее устройство;
- два блока питания – один непосредственно для прибора, другой – для печатающего устройства.

Прибор может работать как от внешнего источника питания, так и от батарейки типа «Крона».

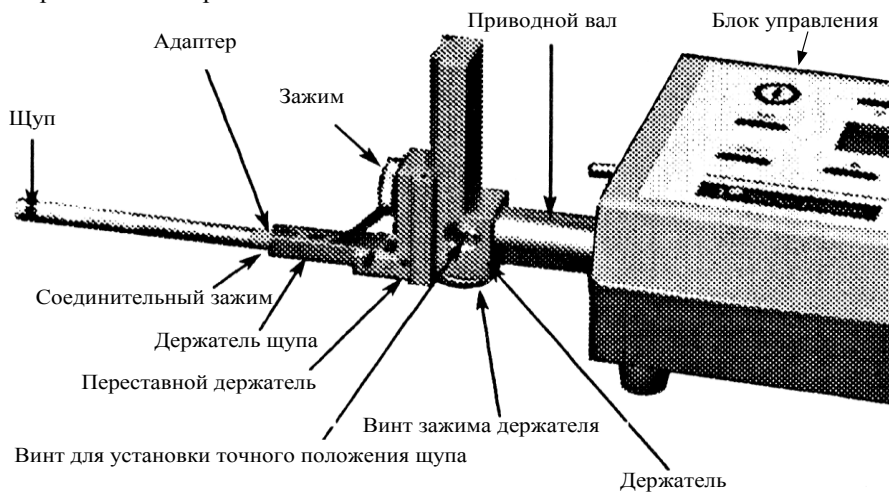


Рисунок 4.1 – Общий вид прибора SURTRONIC 3+

На рис. 4.2. показана принципиальная схема работы данного прибора. После включения прибора механизм привода осуществляет продольное перемещение приводного вала-держателя с определённой постоянной скоростью. С приводным валом связан щуп, на конце которого находится алмазная игла, имеющая возможность перемещаться внутри щупа в

направлении, перпендикулярном движению вала. Щуп является сменной деталью. В комплект поставки входят два стандартных щупа, имеющие алмазную иглу с радиусом округления 10 мкм. При необходимости использования специальных щупов, которые описываются в руководстве пользователя, их следует заказывать у фирмы производителя отдельно.

Алмазная игла связана с индукционным датчиком, сигнал с которого подается в блок управления. При перемещении щупа датчик с пяткой, находящейся возле алмазной иглы, опирается на измеряемую поверхность, скользя по ней. Таким образом, пятка щупа является как бы базой, от которой отсчитывается перемещение иглы щупа. Так как радиус пятки щупа большой, то возможно перемещение щупа не только по гладкой поверхности, но и развитой, например, слоистой. При перемещении щупа с валом-держателем по измеряемой поверхности алмазная игла поднимается и опускается на микронеровностях поверхности. При этом в индукционной катушке, связанной с алмазной иглой, возникает ЭДС, пропорциональная размерам микрогребешка, сканированного иглой. ЭДС подается в прибор, где производится подсчет параметров шероховатости по вышеназванным критериям шероховатости. При этом базовая длина, зависящая от величины шероховатости, выбирается и устанавливается из трех значений – 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм.

После перемещения по исследуемой поверхности (рабочий ход) щуп ускоренно возвращается в первоначальное положение. В это время прибор производит подсчет параметров шероховатости, и данные высвечиваются на экране.

Шероховатость исследовалась при обработке твёрдосплавных пластин Т15К6 формы 0227 после алмазно-искрового шлифования в обычном режиме с использованием СОТС поливом и с применением технологии минимальной смазки при помощи твёрдого смазочного материала упомянутого ранее состава.

Исследовалось влияние режимов резания – нормального давления P_n , скорости шлифования V и характеристик алмазного круга – зернистости Z и концентрации k .

Диапазон изменения режимов резания и характеристик алмазных кругов соответствовал условиям, при которых исследовались коэффициенты шлифования и удельная энергоёмкость процесса. Оптимальные электрические параметры процесса, установленные по наименьшей удельной себестоимости шлифования составляли: среднее значение величины электрического тока $I_{cp} = 5$ А при напряжении $U_{cp} = 40$ В, частота следования импульсов составила $f = 66$ кГц при скважности $n_{скв} = 2$. Ниже представлены результаты исследований и их обсуждение. На рис. 4.3 показано влияние нормального давления на параметр шероховатости Ra .

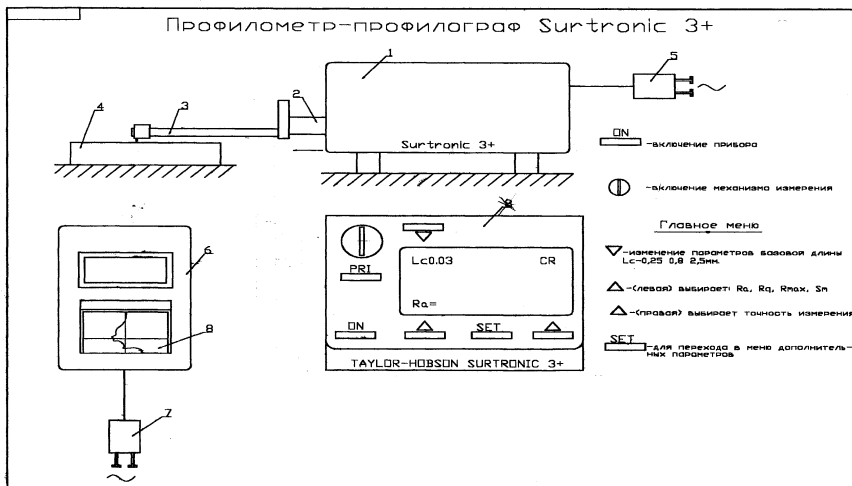


Рисунок 4.2 – Схема профилографа-профилометра SURTRONIC 3+:
 1 – блок управления; 2 – приводной вал-держатель; 3 – измерительный щуп;
 4 – измеряемая поверхность; 5 – блок питания; 6 – принтер; 7 – блок питания;
 8 – профилограмма

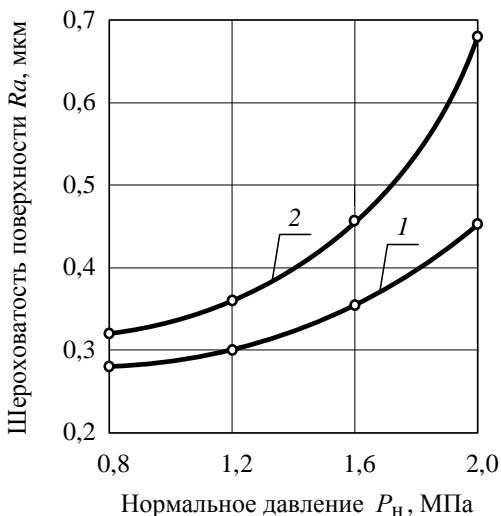


Рисунок 4.3 – Влияние нормального давления на шероховатость поверхности:
 1 – TSM; 2 – COTC поливом.

Условия шлифования: $V = 25$ м/с; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Шероховатость поверхности как при шлифовании с СОТС поливом, так и с применением твёрдого смазочного материала увеличивается во всём диапазоне изменения нормального давления от 0,8 до 2,0 МПа.

Повышение нормального давления приводит к значительному росту сечения среза каждым алмазным зерном, как по ширине, так и по толщине его, что и вызывает формирование микронеровностей с более высокими значениями параметра Ra . Как видно из приведенных результатов, шероховатость поверхности при шлифовании с ТСМ меньше, чем при шлифовании с СОТС поливом.

Влияние скорости резания на шероховатость показано на рис. 4.4. Как следует из приведенных результатов, с увеличением скорости шлифования шероховатость существенно снижается, особенно в диапазоне от 15 до 30 м/с. Это можно объяснить как качественным фактором – число встреч алмазных зерен с обрабатываемой поверхностью в единицу времени увеличивается, следовательно, уменьшается сечение среза, главным образом – его толщина, что и способствует снижению высоты микронеровностей. Кроме того, рост скорости шлифования (число соударений с обрабатываемой поверхностью) вызывает микровыкрашивание поверхности собственно алмазных зёрен с образованием развитого микрорельефа, что также способствует повышению качества обработки.

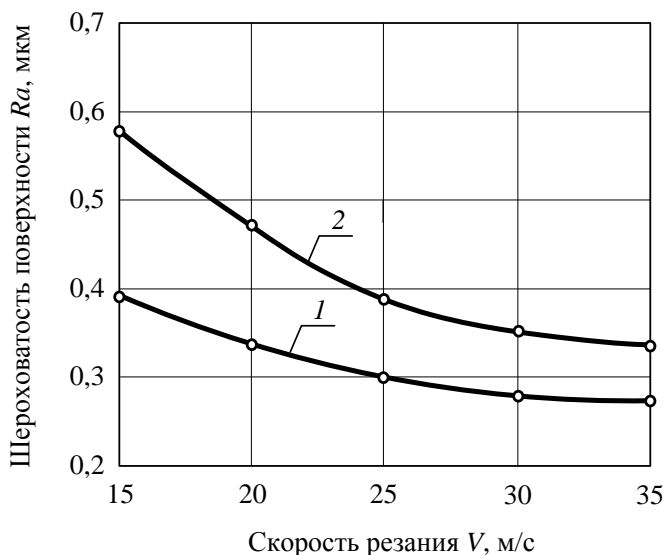


Рисунок 4.4 – Влияние скорости резания на шероховатость поверхности:
1 – ТСМ; 2 – СОТС поливом.

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Влияние характеристик алмазных кругов (зернистость и концентрация) на шероховатость поверхности представлено на рис. 4.5; 4.6.

Зависимость высоты микронеровностей от размера зёрен имеет такой же характер, как и при шлифовании обычными абразивными и алмазными кругами различных материалов [54, 55, 56]. Можно также отметить, что не только фактор собственно размера зёрен оказывает влияние на характер рисок-царапин или высоты выступания их над уровнем связки, но и весьма существенное уменьшение их количества на режущей поверхности круга; Это обстоятельство, особенно при упругой схеме шлифования, вызывает увеличение нагрузок на зёрна и рост сечений единичных срезов и вызывает увеличение высоты микронеровностей и расстояний между ними, т.е. ухудшение качества поверхности.

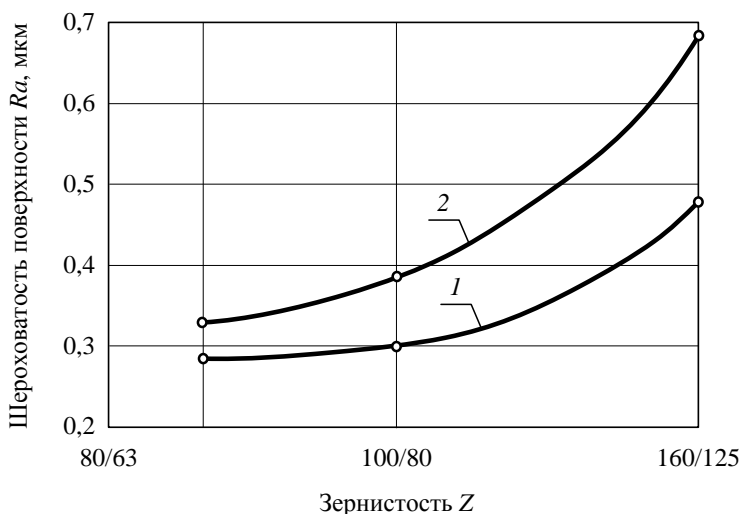


Рисунок 4.5 – Влияние зернистости на шероховатость поверхности:

1 – ТСМ; 2 – СОТС поливом.

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с; $k = 4$;

круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Следует заметить, что взаимовлияние концентрации алмазов в круге и зернистости имеет своеобразный характер воздействия на обрабатываемую поверхность твердого сплава. Вид зависимости на рис. 4.6 прежде всего свидетельствует о том, что повышение концентрации алмазов способствует улучшению качества обработки; объяснить это можно уменьшением разновысотности алмазных зёрен в кругах высоких концентраций и, следовательно, снижением толщины среза каждым зерном.

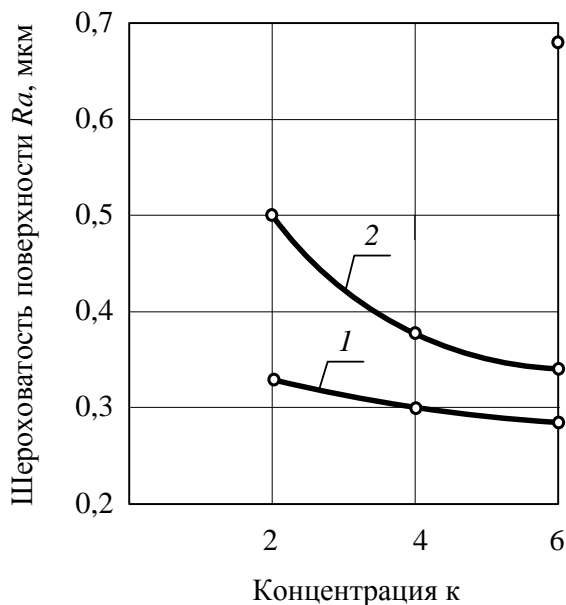


Рисунок 4.6 – Влияние концентрации на шероховатость поверхности:
 1 – ТСМ; 2 – СОТС поливом.

Условия шлифования: $P_{\text{н}} = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с;
 круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Если же говорить о взаимовлиянии концентрации и зернистости, то можно обнаружить следующее. Увеличение зернистости от 80/63 до 100/80 уменьшает количество зёрен на поверхности алмазного круга в 1,54 раза, а до зернистости 160/125 – в 3,62 раза [57], а увеличение концентрации от 2 до 6 естественно и соответственно увеличивает количество зёрен в 3 раза. Поэтому, если обработка твёрдых сплавов производится в процессе алмазно-искрового шлифования, обеспечивающего активное самозатачивание режущего рельефа алмазных кругов, то фактор повышения концентрации в значительной степени нивелирует ухудшение качества обработки при увеличении зернистости. С увеличением концентрации для различных зернистостей уменьшается поперечное сечение единичных срезов, что вызывает сглаживание микровыступов и выравнивание глубоких остаточных рисок на шлифуемой поверхности.

Кроме того, следует иметь в виду, что на зёрнах более крупных размеров с увеличением их количества (концентрации) при микровыкрашивании будут образовываться развитые микрокромки в большом количестве, что также отразится на качестве обработки.

Главным итогом проведенных сравнительных исследований шероховатости поверхности для различных условий шлифования с применением СОТС поливом и технологии минимальной смазки с твёрдым смазочным материалом является улучшение качества обработанной поверхности твёрдого сплава при шлифовании по новой технологии.

Следует отметить, что кроме смазывающего действия среды ТСМ, постоянный приток и присутствие групп легкоподвижных атомов из карбоксильной составляющей и углеводородных радикалов поверхностно-активных компонентов состава смазки вызывает деструктивное воздействие этой среды на материал, снижая в определенной степени работу диспергирования, способствуя улучшению качества.

Специфическое воздействие смазочной среды на адсорбируемые поверхности обрабатываемых материалов особенно заметно проявляется при шлифовании композиции «твёрдый сплав–сталь».

4.2. Исследование остаточных напряжений

Шлифование является одним из самых напряжённых процессов механической обработки резанием. Кроме массового процесса микрорезания абразивными зёрнами на условия контактного взаимодействия рабочей поверхности шлифовального круга и обрабатываемого материала большое влияние оказывает связка [58]. Поэтому шлифование сопровождается большой силовой и тепловой напряжённостью. Это вызывает образование в тонком приповерхностном слое остаточных напряжений, которые являются результатом действия трёх основных факторов – фазового, силового и теплового. Фазовый фактор вызван изменениями удельного объёма соответствующих фаз в связи с фазовыми превращениями. Силовой и тепловой факторы и их взаимовлияние зависят от уровня температур в зоне резания и сил шлифования. Отмеченные обстоятельства приводятся в ряде работ [59, 60, 61, 62]. Следует заметить, что фазовые превращения, в основном, могут иметь место при обработке железоуглеродистых сплавов, при этом однозначного мнения об их влиянии на остаточные напряжения не имеется [62, 63, 64].

При шлифовании твёрдых сплавов нет основания считать, что в их структуре происходят заметные фазовые превращения, оказывающие влияние

на остаточное напряженное состояние. Что касается силового и теплового факторов, то можно считать, что они оказывают превалирующее влияние на остаточные напряжения в твёрдых сплавах после шлифования. Считается установленным, что влияние силового фактора вызывает формирование сжимающих остаточных напряжений [62, 65], а теплового – растягивающих [53, 60, 61, 62]. Вместе с тем, информация об определяющем влиянии знака и величины остаточных напряжений на работоспособность шлифованных инструментов неоднозначна [61, 64, 67, 68, 69]. Несмотря на это, всё же можно отметить, что большинство авторов полагают, что остаточные напряжения сжатия способствуют повышению износостойкости шлифованных инструментов [62, 70, 71, 72].

Поскольку работа посвящена повышению эффективности процесса шлифования с применением технологии минимальной смазки при шлифовании и запатентованного твёрдого смазочного материала (ТСМ), то несомненно представляет интерес исследование остаточных напряжений в сравнении с результатами, полученными при шлифовании СОТС поливом. При этом известно, главным эффектом использования СОТС поливом при шлифовании считается эффект охлаждения.

Как отмечалось ранее, шлифование твёрдых сплавов осуществляется с введением дополнительной энергии в зону резания в виде электрических импульсов (АИШ). В связи с этим могут иметь место особенности влияния силового и теплового факторов на остаточное напряженное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала. Активное самозатачивание алмазных кругов и длительное сохранение развитого режущего рельефа, по-видимому, будут способствовать меньшей теплонапряжённости процесса и более заметному влиянию силового фактора на остаточные напряжения.

В качестве образцов для сравнения разных процессов шлифования были выбраны твёрдосплавные пластинки ВК8 формы 0227. Выбор этого материала связан с тем, что в его составе нет существенно отличающихся по свойствам и по процентному составу фаз с высокими значениями микротвёрдости, как, например, в сплаве Т15К6 с фазами TiC и WC, в котором межфазные напряжения могут вносить существенный вклад в общее напряжённое состояние, что ранее отмечалось во многих работах. Главной же целью наших исследований являлась оценка потенциального преимущества процесса АИШ с применением технологии минимальной смазки по сравнению с использованием СОТС струйным поливом при формировании остаточных макронапряжений; представляет большой интерес – изменится ли уровень и знак остаточных напряжений при АИШ твёрдого сплава при отсутствии охлаждающего эффекта СОТС. Шлифование пластин разными способами

производилось в одинаковых условиях: $P_{\text{н}} = 1,2$ МПа, $V = 25$ м/с, $Z = 100/80$, $k = 4$.

Для исследований использовались образцы в исходном состоянии и после шлифования в соответствующих условиях – СОТС поливом и технология минимальной смазки с твёрдым смазочным материалом. Модельные образцы подвергались рентгеновскому исследованию с помощью дифрактометра ДРОН 2.0 в фильтрованном излучении железного анода. Дифрактограмма регистрировалась поточечно через $0,1^\circ$ с экспозицией в каждой точке $10''$.

Анализ напряженного состояния проводился с помощью $\sin^2 \psi$ -метода. Для съёмок бала выбрана линия $[112]$ WC на угле $2\theta \approx 145^\circ$. Для каждого образца были проведены перпендикулярная съёмка и наклонные съёмки при $\psi = \pm 30^\circ$ и $\psi = \pm 50^\circ$. Величину остаточных напряжений определяли по формуле

$$\sigma = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{d_\psi - d_\perp}{d_\perp} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi},$$

где E – модуль нормальной упругости;

μ – коэффициент Пуассона;

d_ψ , d_\perp – межплоскостные расстояния, измеренные под углом и по нормали к поверхности образца;

ψ – угол между нормалью к поверхности образца и соответствующей нормалью к отражающим плоскостям.

Для расчётов напряжений приняты макроскопические значения модулей упругости и коэффициента Пуассона: $E = 720$ ГПа, $\mu = 0,18$ [14]. Тогда

значения упругих постоянных $\frac{E}{1+\mu}$, принятые при расчётах соответствующей фазы WC составляет 610 ГПа.

Теоретическая погрешность в определении напряжений для карбидов вольфрама составляла от $\pm 0,04$ до $\pm 0,06$ ГПа; действительная погрешность, благодаря применению $\sin^2 \psi$ -метода оказывается меньше.

Результаты исследований межплоскостных расстояний $d(112)$ различными углами ψ для разных образцов твёрдого сплава ВК8 – в исходном состоянии, после АИШ с СОТС поливом и после АИШ по технологии минимальной смазки представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Значения межплоскостных расстояний $d(112)$ для различных образцов и углов ψ

Образцы сплава ВК8	ψ , град.	$d \pm 1 \cdot 10^{-4}$, А°
Исходное состояние	0	1,01516
	+50	1,01493
	+30	1,01507
	-30	1,01516
	-50	1,01493
После АИШ с СОТС поливом	0	1,01608
	-50	1,01480
	-30	1,01560
	+30	1,01545
	+50	1,01446
После АИШ по технологии минимальной смазки	0	1,01614
	+50	1,01467
	+30	1,01540
	-30	1,01556
	-30	1,01474

На рис. 4.7 приведены $\sin^2 \psi$ -графики исследованных образцов. Представленные графики позволяют оценить уровень деформации, а также знак и величину остаточных макронапряжений.

Анализ графиков показывает, что для исходного образца $\sin^2 \psi$ -график представляет собой прямую линию, параллельную оси $\sin^2 \psi$, что свидетельствует об отсутствии деформаций и макронапряжений в исследованном образце после спекания.

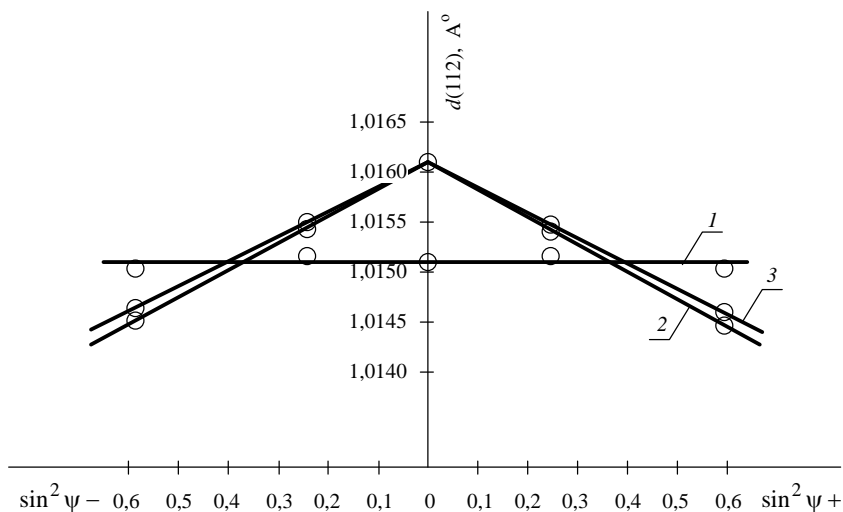


Рисунок 4.4 – $\sin^2\psi$ -графики исследованных образцов:
 1 – исходное состояние; 2 – после АИШ с СОТС поливом; 3 – после АИШ по технологии минимальной смазки

Характер изменения $\sin^2\psi$ -графиков у образцов, обработанных алмазно-искровым шлифованием с применением СОТС поливом и по технологии минимальной смазки с применением твёрдого смазочного материала практически одинаков.

Выявленные деформации составляют $\varepsilon = 2,6 \cdot 10^{-3}$, а остаточные макронапряжения носят сжимающий характер и составляют $\sigma = -1,6$ ГПа, что свидетельствует о превалировании силового фактора при формировании остаточных напряжений. Полученные результаты, по нашему мнению, можно оценить как имеющие существенное практическое значение. Суть его состоит в том, что при АИШ с применением твёрдого смазочного материала, несмотря на отсутствие СОТС поливом как охлаждающего фактора, тепловой фактор не превалирует при шлифовании и формировании остаточного напряжённого состояния.

Это еще раз подтверждает тот факт, что при АИШ твёрдых сплавов в различных условиях, если обеспечивается развитость рельефа алмазного круга, главным фактором, определяющим характер взаимодействия режущей и обрабатываемой поверхностей является воздействие алмазных зёрен и, следовательно, тепловой фактор не может стать доминирующим.

4.3. Сравнительный анализ инжиниринга качества при шлифовании с СОТС и с применением технологии минимальной смазки

Как известно, существуют различные критерии оценки качества обработки изделий – шероховатость поверхности, физическое состояние поверхностного слоя, остаточные напряжения и др. Результаты анализа влияния названных показателей качества на потенциальную работоспособность изготовленных деталей не однозначны [61, 64, 66, 67, 68].

Кроме того, взвешенный подход необходим при определении стоимостных оценок процесса при непосредственном изготовлении изделий. Например, низкий относительный расход алмазов и невысокая себестоимость обработки при шлифовании не всегда отражают лучший вариант и рациональность процесса. Поэтому более важным представляется рассмотрение результатов шлифования не только и не столько при изготовлении изделий и инструмента, сколько в процессе их эксплуатации. Естественно, что потребителя интересует надёжность приобретенного инструмента и экономическая целесообразность его применения. Поэтому представляют большой интерес подходы, связанные с инжинирингом качества, которые находят применение в последнее время. Это дает возможность оценивать качество изготовления и одновременно применения в стоимостном выражении [73].

Важной особенностью этого подхода является отношение к основным показателям производственной продукции, которыми являются качество и стоимость. Отдавая предпочтение экономическому фактору, следует отметить, что стоимость и качество связываются одной характеристикой, названной функцией потерь [74, 75]. При этом учитываются потери как со стороны изготовителя, так и со стороны потребителя. Таким образом, основная задача состоит в удовлетворении обеих сторон – изготовителя и потребителя. Поэтому, если оценивать качество в стоимостном выражении для потребителя, то это позволяет более эффективно конкурировать при реализации продукции.

Применительно к нашим условиям шлифования, фактически представляется возможным оценить надёжность шлифованных инструментов в стоимостном выражении. При этом интегральным показателем качества является суммарная технологическая себестоимость, которая включает не только себестоимость собственно процесса шлифования ($C_{ш}$), но и учитывает стойкость заточенных инструментов с помощью оценки длины пути резания до определенного критерия затупления.

Суммарная технологическая себестоимость рассчитывалась по известной методике [76]; выражение ее имеет вид:

$$C_{\tau} = 37,2 + \frac{(466,05 + 0,16C_{ш})V}{4L},$$

где $C_{ш}$ – удельная себестоимость шлифования (заточки), коп/см³;

L – длина пути резания, м.

Длина пути резания L при точении до определенного критерия затупления рассчитывалась по формуле

$$L = \frac{\pi dl}{1000s},$$

где d – диаметр заготовки, мм;

l – длина обработанной поверхности, мм;

s – подача при точении, мм/об.

Расчёт себестоимости шлифования рассмотрен в главе 3. Стойкость инструментов из твёрдого сплава Т15К6 после соответствующих условий шлифования определялась при точении закаленной стали ХВГ (55–58 HRC), диаметр заготовки $d = 50$ мм, длина её – 200 мм, длина обработанной поверхности вдоль оси заготовки определялась с учётом количества проходов.

Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке 16К20 при таких режимах резания: скорость резания $V = 70$ м/мин; подача $s = 0,15$ мм/об, глубина резания $t = 0,5$ мм.

Геометрические параметры режущей части составляли: $\gamma = 5^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\lambda = 0^\circ$.

В качестве критерия затупления был принят износ по задней поверхности $h_3 = 0,4$ мм; измерение износа производилось непосредственно на станке при помощи переносного микроскопа «Мир-2».

Сравнение суммарной технологической себестоимости производилось у инструментов после алмазно-искрового шлифования с использованием СОТС поливом и с применением технологии минимальной смазки, в качестве которой использовался твёрдый смазочный материал в составе стеариновой и себациновой кислот в соотношении 1:1 (согласно патенту).

В предыдущем разделе было показано, что при шлифовании с различной технологией в поверхностном слое твёрдого сплава формируются остаточные макронапряжения сжатия, практически не отличающиеся по величине. Это свидетельствует о том, что при их формировании превалирует силовой фактор над тепловым; процесс алмазно-искрового шлифования обеспечивает развитость режущего рельефа алмазного круга и весьма незначительное влияние связки на условия его работы.

Представляется целесообразным учитывать другие факторы, характеризующие преимущество шлифования с применением технологии минимальной смазки.

В табл. 4.2 приведены сравнительные результаты шлифования твёрдого сплава Т15К6 при таких условиях: $P = 1,6$ МПа; $V = 30$ м/с; зернистость 100/80 и концентрация 4.

Таблица 4.2 – Сравнительные показатели процесса АИШ

Показатели процесса	Производительность шлифования Q , мм ³ /мин	Относительный расход алмазов q , мг/г	Себестоимость шлифования $C_{ш}$, коп/см ²	Шероховатость поверхности Ra , мкм
СОТС поливом	875	0,76	42	0,40
Технология минимальной смазки	980	0,65	31	0,32

Как видно, относительное преимущество по косвенным показателям, характеризующим собственно процесс шлифования, имеет место при шлифовании с применением технологии минимальной смазки. Однако преобладающее значение при оценке разных условий шлифования, как нами отмечалось ранее, должны иметь показатели работоспособности заточенных инструментов, т.е. оценка, в конечном итоге, суммарной технологической себестоимости, обеспечиваемой соответствующей технологией обработки.

На рис. 4.8 приведена сравнительная диаграмма значений шероховатости поверхности, длины пути резания и суммарной технологической себестоимости при различных способах шлифования.

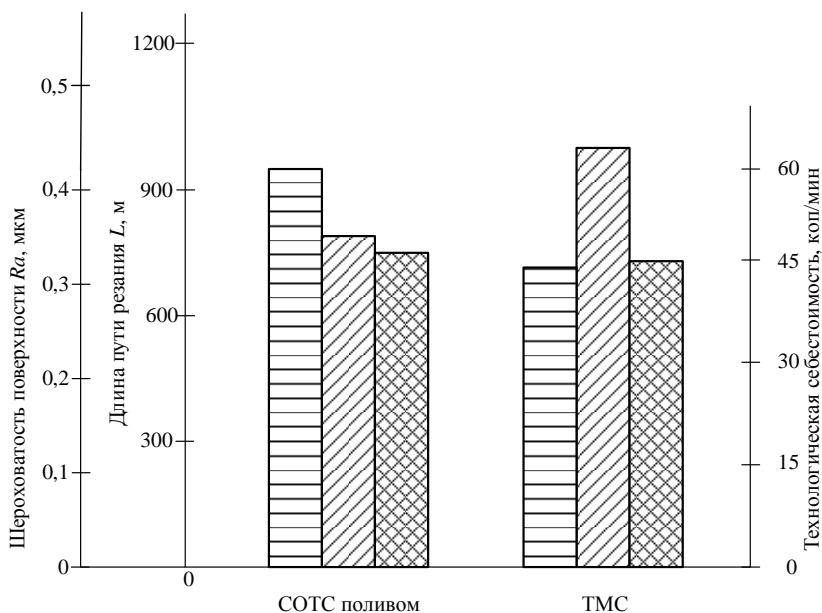


Рисунок 4.8 – Сравнительная диаграмма значений шероховатости поверхности, длины пути резания и суммарной технологической себестоимости:

круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4; обрабатываемый твёрдый сплав T15K6

□ – R_a , ▨ – L , ▩ – C_{Σ}

Анализ представленных результатов показывает, что работоспособность заточенных инструментов обеспечивается большей длиной пути резания, на что, наряду с другими факторами (см. табл. 4.2), оказывает влияние шероховатость задних поверхностей инструмента, обеспечивающая большую его износостойкость. Следствием влияния отмеченных факторов является меньшая суммарная технологическая себестоимость обработки.

Таким образом, стоимостная оценка качества, характеризующая надёжность заточенных инструментов, является весьма важным фактором, отвечающим современным тенденциям, соответствующим инжинирингу качества.

Выводы

1. Изучено влияние режимов резания – нормального давления (P_n), скорости (V) и характеристик алмазных кругов – зернистости (Z), концентрации (k) на шероховатость поверхности твёрдого сплава при

шлифовании с применением технологии минимальной смазки и СОТС поливом.

2. Выявлено преимущество процесса шлифования по параметру шероховатости Ra для различных условий взаимодействия круга с твердым сплавом при шлифовании с ТСМ по сравнению с СОТС поливом в среднем на 25 %.

3. Изучено состояние поверхностного слоя твёрдого сплава после алмазно-искрового шлифования с СОТС поливом и с применением технологии минимальной смазки с помощью твёрдого смазочного материала. Выявлен сжимающий характер остаточных макронапряжений (при $P = 1,2$ МПа, $V = 25$ м/с, $Z = 100/80$, $k = 4$ $\sigma = -1,6$ МПа), что свидетельствует о превалировании силового фактора при их формировании. При этом значения макронапряжений при различных способах шлифования практически одинаковы, т.е. с применением ТСМ, несмотря на отсутствие СОТС поливом как охлаждающего фактора, тепловой фактор не превалирует при шлифовании и формировании остаточного напряженного состояния.

4. Произведена стоимостная оценка качества инструмента из твёрдого сплава при шлифовании различными способами – СОТС поливом и с применением технологии минимальной смазки с учётом стойкости инструмента, характеризуемой длиной пути резания при точении до принятого критерия износа, т.е. реализован подход, соответствующий инжинирингу качества.

Показано, что большая работоспособность заточенных инструментов (длина пути резания) обеспечивается, наряду с другими факторами, меньшими значениями параметра шероховатости его задних поверхностей, что в конечном итоге способствует снижению суммарной технологической себестоимости обработки при шлифовании с применением технологии минимальной смазки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение СОТС струйным поливом при механической обработке, особенно при шлифовании, имеет целый ряд недостатков, отмеченных в технической литературе; большое значение приобретают и экологические аспекты её использования.

2. В последнее время получает распространение, так называемая, техника (технология) минимальной смазки, которую можно считать альтернативой использованию СОТС на операциях механической обработки резанием; вместе с тем, применение этой технологии при шлифовании не рассматривается и считается неэффективным.

3. Разработка условий и реализация возможностей применения технологии минимальной смазки при шлифовании твёрдых сплавов, особенно с введением дополнительной энергии в зону резания (АИШ) и использования твёрдого смазочного материала (ТСМ), является весьма перспективным.

4. Установлен оптимальный состав ТСМ, представляющий смесь равных частей стеарина и себаценовой кислоты (Патент Украины), который является экологически безопасным и обеспечивает более высокие показатели процесса АИШ – производительности, относительного расхода алмазов и удельной себестоимости шлифования – по сравнению с СОТС струйным поливом.

5. Установлены рациональные электрические параметры процесса АИШ с применением технологии минимальной смазки, обеспечивающие высокую работоспособность алмазных кругов при наименьшей удельной себестоимости – частота импульсов $f = 66$ кГц, энергия единичных разрядов $W = 15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж, скважность $n_{\text{скв}} = 2$, время единичного импульса $\tau = 7,6$ мкс.

6. Изучение и анализ особенностей взаимодействия режущей поверхности алмазных кругов с обрабатываемым твёрдым сплавом в различных условиях показали, что значения коэффициентов шлифования ($K_{\text{ш}}$) меньше по предлагаемой технологии, а значит меньше и напряжённость процесса АИШ.

7. Установлены меньшие значения энергоёмкости процесса АИШ с применением ТСМ по сравнению с использованием СОТС поливом, что объясняется специфическим механизмом воздействия смазочной среды на адсорбированные поверхности материала, особенно при шлифовании композиции «твёрдый сплав–сталь»; инициирование адсорбционных эффектов, вызываемых компонентами в составе ТСМ, способствует понижению свободной поверхностной энергии, хрупкой прочности и работы диспергирования.

8. Электронно-микроскопические исследования состояния режущей поверхности кругов и алмазных зёрен свидетельствуют о развитости рельефа, при использовании ТСМ; алмазные зёрна изнашиваются скалыванием

отдельных элементов, микровыкрашиванием с образованием новых острых кромок, усталостный характер износа также имеет место.

9. Установлены закономерности и отличительные особенности обработки твёрдых сплавов. Увеличение скорости резания в меньшей степени влияет на снижение удельной себестоимости шлифования, чем нормальное давление; в процессе АИШ с применением технологии минимальной смазки скорость резания незначительно влияет на самозатачиваемость алмазных кругов, т.к. их высокая режущая способность обеспечивается воздействием электрических разрядов на металлическую связку круга.

10. Двумерные сечения поверхностей отклика и расчётные однофакторные зависимости, полученные с помощью планирования экспериментов позволили установить оптимальные условия АИШ твёрдых сплавов с использованием ТСМ, обеспечивающие наименьшую удельную себестоимость обработки: $P_n = 1,6$ МПа; $V = 30$ м/с; $Z = 100/80$, $k = 4$ (100 %).

11. Установлено, что при различных условиях шлифования значения шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra в среднем на 25 % меньше при использовании применяемой смазочной среды по сравнению с обработкой СОТС поливом.

12. Исследование остаточного напряжённого состояния обработанной поверхности твёрдого сплава позволило установить, что при шлифовании с применением технологии минимальной смазки, также как и при шлифовании с СОТС поливом, в поверхностном слое формируются остаточные макронапряжения сжатия ($\sigma = -1,6$ МПа) с превалированием силового фактора; следовательно, тепловой фактор не оказывает заметного влияния на уровень и характер макронапряжений при шлифовании с ТСМ, несмотря на отсутствие охлаждающего фактора в виде СОТС поливом.

13. Рассчитанная суммарная технологическая себестоимость обработки, которая включает не только удельную себестоимость собственно шлифования, но и учитывает стойкость заточенных инструментов по длине пути резания при точении, позволяет произвести стоимостную оценку качества, т.е. реализовать подход, соответствующий инжинирингу качества. Показано, что применение технологии минимальной смазки по сравнению с СОТС поливом при АИШ обеспечивает более высокую износостойкость инструментов при их эксплуатации и соответственно – меньшую суммарную технологическую себестоимость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. с. 494130 СССР, МКИ В24 В 1/00. Способ абразивной обработки металлов / М. Ф. Семко, Н. К. Беззубенко, И. С. Сальтевский, А. Т. Калашников (СССР). – №1828222/25–08; заявл. 12.09.72; опубл. 25.06.76, Бюл. №31 // Открытия. Изобретения. – 1976. – №31. – С. 170.
2. Беззубенко Н. К. Место нового процесса алмазно-абразивно-искрового шлифования в ряду комбинированных электрохимических и электротехнических методов обработки / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – 1974. – Вып. 9. – С. 133–139.
3. Основы алмазного шлифования / Семко М. Ф., Грабченко А. И., Раб А. Ф. и др. – К. : Техніка, 1978. – 192 с.
4. Кундиев Ю. Н. Гигиена и токсикология смазочно-охлаждающих жидкостей для механической обработки металлов. Методические рекомендации / Ю. Н. Кундиев, И. М. Трахтенберг, Г. В. Поруцкий. – К. : Здоровье, 1982. – 120 с.
5. Цуцков М. Е. Средства защиты рук рабочих на машиностроительных предприятиях / М. Е. Цуцков, В. Н. Ардасенов. – М. : Машиностроение, 1983. – 111 с.
6. Якубов Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь : ОАО Симферопольская городская типография (СГТ), 2008. – 156 с.
7. Бердычевский Е. Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов : справочник / Е. Г. Бердычевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Беззубенко Н. К. Особенности работы алмазного инструмента в интенсифицированном режиме / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – 1981. – Вып. 25. – С. 39–43.
9. Семко М. Ф. Алмазно-искровое шлифование безвольфрамовых твердых сплавов / М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Ю. С. Краснощек // Сверхтвердые материалы. – 1980. – №1. – С. 42–47.
10. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов : справочник / под ред. С. Г. Энгелиса. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
11. Якимов А. В. Оптимизация процессов шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 176 с.
12. Трент Е. М. Резание металлов / Е. М. Трент : пер. с англ. Г. И. Айзенштока. – М. : Машиностроение, 1980. – 236 с.
13. Старков В. К. Шлифование высококористыми кругами / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2007. – 688 с.
14. Фукс М. Я. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовой обработки / М. Я. Фукс, Н. К. Беззубенко, Б. М. Свердлова. – К. : Вища школа, 1979. – 160 с.

15. Адлер Ю. П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
16. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 359 с.
17. Артамонов Б. А. Размерная электрическая обработка металлов / Б. А. Артамонов. – М. : Высшая школа, 1978. – 336 с.
18. Ящерицын П. И. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов / П. И. Ящерицын, В. Д. Дорофеев, Ю. А. Пахалин. – Минск : Наука и техника, 1981. – 232 с.
19. Иванов Н. П. Термодинамическая модель процесса абразивно-эрозионного шлифования / Н. П. Иванов // Резание и инструмент. – 1979. – Вып. 21. – С. 128–135.
20. Богомолов Н. И. О работе трения в абразивных процессах / Н. И. Богомолов // Тр. ВНИИМаш. – 1965. – №1. – С. 31–35.
21. Муцянюк В. И. Коэффициент шлифования как критерий оценки процесса / В. И. Муцянюк, В. И. Островский // Тр. ВНИИМаш. – 1965. – №1. – С. 337–340.
22. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, А. М. Терещенко. – М. : Машиностроение, 1977. – 263 с.
23. Зубарь В. П. Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами / В. П. Зубарь, В. К. Крюков, В. В. Алмосов // Резание и инструмент. – 1975. – Вып. 13. – С. 54–58.
24. Королев А. П. Исследование процесса образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. П. Королев. – Саратов, 1975. – 189 с.
25. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
26. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.
27. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – М. : Машиностроение, 1979. – 242 с.
28. Лоладзе Т. Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т. Н. Лоладзе, Г. В. Бокучава. – М. : Машиностроение, 1967. – 112 с.
29. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел / Ф. Боуден, Д. Тейлор. – М. : Машиностроение, 1968. – 534 с.
30. Щукин Е. Д. Физико-химические основы новых методов интенсификации обработки твердых тел / Е. Д. Щукин // Ежегодник «Физическая химия. Современные проблемы». – М. : Химия, 1983. – С. 30–40.

31. Власов В. И. Вопросы износа алмазных шлифовальных кругов на металлических связках / В. И. Власов // Алмазы. – 1968. – Вып. 4. – С. 18–21.
32. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Х. : Вища школа, 1985. – 184 с.
33. Корж Н. Я. Некоторые особенности механизма износа алмазных кругов / Н. Я. Корж // Сверхтвердые материалы. – 1980. – №4. – С. 35–45.
34. Семко М. Ф. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко. – К. : Вища школа, 1980. – 192 с.
35. Работоспособность алмазных кругов / [Семко М.Ф., Узунян М. Д., Сизый Ю. А. и др.]. – Киев : Техника, 1983. – 95 с.
36. Электронно-микроскопическое исследование характера износа единичных алмазных зерен / [Семко М. Ф., Красильников Ю. А., Сизый Ю. А. и др.] // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 220. – №6. – С. 1303–1305.
37. Грабченко А. И. Исследование субмикрорельефа алмазных зерен / А. И. Грабченко, Е. В. Красильников // Резание и инструмент. – 1972. – Вып. 5.
38. Электронно-микроскопические исследования характера износа единичных алмазных зерен / Семко М. Ф., Красильников Е. В., Сизый Ю. А., Узунян М. Д. // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 220. – №6. – С. 1303–1306.
39. Хирст В. Износ хрупких материалов / В. Хирст // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М. : Наука, 1971. – С. 23–27.
40. Семко М. Ф. Экономическое обоснование выбора алмазного круга / М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Э. П. Юфа. – Х. : Прапор, 1971. – 100 с.
41. Евдокимов Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М. : Наука, 1980. – 228 с.
42. Душинский В. В. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В. В. Душинский, Е. С. Пуховский, С. Г. Радченко. – К.: Техніка, 1977. – 176 с.
43. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – М. : легкая индустрия, 1974. – 263 с.
44. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К. : Вища школа, 1986. – 184 с.
45. Мельников С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алёшкин, П. М. Рошин. – Л. : Колос, 1972. – 204 с.
46. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М. : Статистика, 1974. – 217 с.

47. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / под. ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.
48. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – К. : Наук. думка, 1981. – 300 с.
49. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко. – К. : Техника, 1980. – 215 с.
50. Захаренко И. П. Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве / И. П. Захаренко. – К. : Вища школа, 1985. – 152 с.
51. Захаренко И. П. Алмазно-электролитическая обработка инструмента / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко. – К. : Наук. думка, 1978. – 224 с.
52. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
53. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / Семко М. ф., Грабченко А. И., Левченко Н. В., Раб А. Ф. – К. : Вища школа, 1974. – 118 с.
54. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 242 с.
55. Терещенко Л.М. Микрогеометрия поверхности безвольфрамовых твёрдых сплавов после электролитического алмазного шлифования / Л. М. Терещенко, Н. С. Тарахнов // Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки. – 1979. – Вып. 3. – С. 10–17.
56. Маслов Е. Н. Абразивная обработка металлов / Е. Н. Маслов, С. А. Попов // Развитие науки о резании металлов. – 1967. – С. 335–379.
57. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Х. : НТУ «ХПИ», 2003. – 359 с.
58. Семко М. Ф. Влияние связки на работу алмазных кругов / Семко М. Ф., Грабченко А. И., Узунян М. Д. // Машиностроение. – 1965. – №5. – С. 24–27.
59. Буланов В. Я. Влияние алмазной обработки на состояние поверхностного слоя инструмента из быстрорежущей стали / В. Я. Буланов, А. П. Шевель, П. А. Юдковский // Физико-химическая механика материалов. – 1968. – №6. – С. 703–706.
60. Ланда В. А. Структурные превращения, возникающие при шлифовании инструментальных сталей / В. А. Ланда // Физические методы исследования и контроля инструментальных сталей. – 1963. – С. 95–109.
61. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – М. : Машгиз, 1956. – 242 с.
62. Фукс М. Я. Состояние поверхностного слоя материалов после алмазной и эльборовой обработки / М. Я. Фукс, Н. К. Беззубенко, Б. М. Свердлова. – К. : Вища школа, 1979. – 160 с.

63. Грозин Б. Д. Влияние режимов шлифования на напряженное состояние мартенситовой фазы / Б. Д. Грозин, С. Б. Нижник // Докл. АН УССР. – 1960. – №1. – С. 40–43.
64. Качество поверхности, обработанной алмазами / Шульман П. А., Созин Ю. И., Колесниченко Н. Ф., Вишневецкий А. С. – К. : Техніка, 1972. – 148 с.
65. Кравченко Б. А. Повышение выносливости и надёжности деталей машин и механизмов / Б. А. Кравченко. – Куйбышев : Куйб. кн. изд-во, 1966. – 222 с.
66. Лошак М. Г. Влияние режимов алмазного шлифования на напряжённое состояние и прочность твёрдого сплава ВК6 / М. Г. Лошак // Синтетические алмазы. – 1973. – Вып. 1. – С. 23–27.
67. Гринаф Д. Остаточные напряжения, связанные с деформациями кристаллической решетки / Д. Гринаф ; под. ред. В. Р. Осгуда // Остаточные напряжения. – 1987. – С. 312–326.
68. Куклин Л. И. Повышение прочности и износостойкости твердосплавного инструмента / Л. И. Куклин. – М. : Машиностроение, 1968. – Разд. 5. – 140 с.
69. Лошак М. Г. Упрочнение твердых сплавов / М. Г. Лошак, А. С. Александрова. – К. : Наук. думка, 1977. – 107 с.
70. Остаточные напряжения в твердых сплавах после алмазного шлифования [Семко М. Ф., Свердлова Б. М., Гладких Л. И. и др.] // Резание и инструмент. – 1971. – Вып. 3. – С. 51–59.
71. Захаренко И. П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой / И. П. Захаренко, Л. А. Шепелев. – К. : Наук. думка, 1976. – 215 с.
72. Краснощёк Ю. С. Оптимальные условия алмазного электроискрового шлифования твёрдых сплавов / Ю. С. Краснощек, Б. М. Свердлова, М. Д. Узунян // Сверхтвёрдые материалы. – 1979. – №1. – С. 48–53.
73. Харрингтон Дж. Х. Управление качеством в американских корпорациях / Дж. Х. Харрингтон. – М. : Экономика, 1990. – 271 с.
74. Куцын А. Н. Конкурентоспособность и качество машиностроительной продукции / А. Н. Куцын, Б. М. Арпентьев, А. С. Зенкин. – К. : Техніка, 1997. – 165 с.
75. Современная концепция качества за рубежом. – М. : Госстандарт РФ, 1992. – 56 с.
76. Крючков В. Я. Технологическая себестоимость обработки инструментами из безвольфрамовых твердых сплавов / В. Я. Крючков, М. Д. Узунян // Перспективы развития резания конструкционных материалов : всесоюз. науч.-техн. конф. : сб. докл. – М., 1980. – С. 226–232.

77. Dhar N. R.. Effect of minimum quantity lubrication on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning steel / Dhar N. R., Islam S., Kamruzzaman M. – G. U. Journal of Science, 2007. – № 20(2). – P. 23–32.

78. Liao Y. S. Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool / Liao Y. S., Lin H. M., Chen Y. C. – Machine tools & manufacture, 2007. – №47. – P. 1667–1676.

79. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear / Attanasio A., Gelfi M., Giardini C., Remino C. – Journal of Materials Processing Technology, 2006. – №260. – P. 333–338.

80. Chaudhari S. S. Optimization of process parameters using Taguchi approach with minimum quantity lubrication for turning / Chaudhari S. S., Khedkar, S. S., Borkar N. B. – International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2007. – Vol. 1. – Issue 4. – P. 1268–1273.

81. Thamizhmanii S. A study of minimum quantity lubrication on Inconel 718 steel / Thamizhmanii S., Rosli, Hasan S. – Archives of Materials Science and Engineering, 2009. – V. 39. – Is. 1. – P. 38–44.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Влияние различных условий АИШ на показатели работоспособности кругов

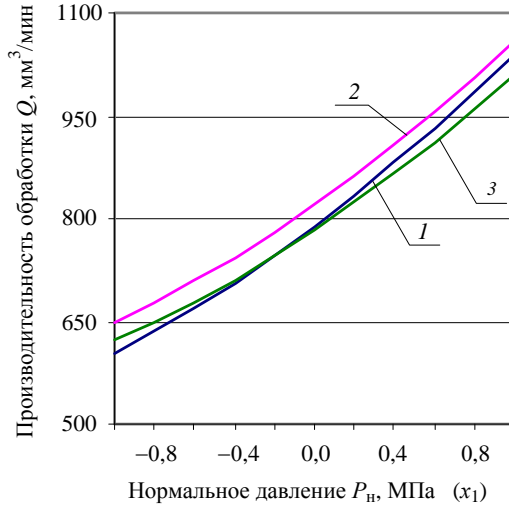


Рисунок А.1 – Влияние P_n на Q : $Z = 100/80$; $\kappa = 4$;
1 – $V = 35$ м/с; 2 – $V = 25$ м/с; 3 – $V = 15$ м/с

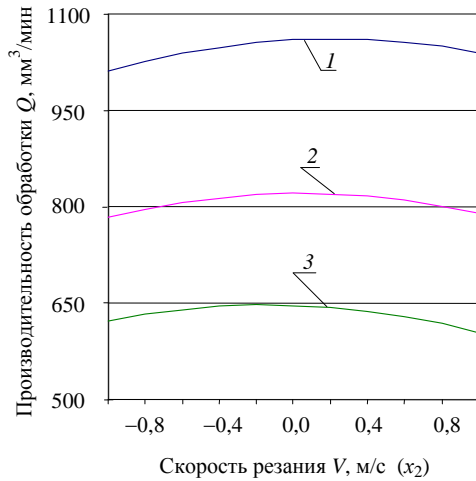


Рис. А.2. Влияние V на Q : $Z = 100/80$; $\kappa = 4$;
1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

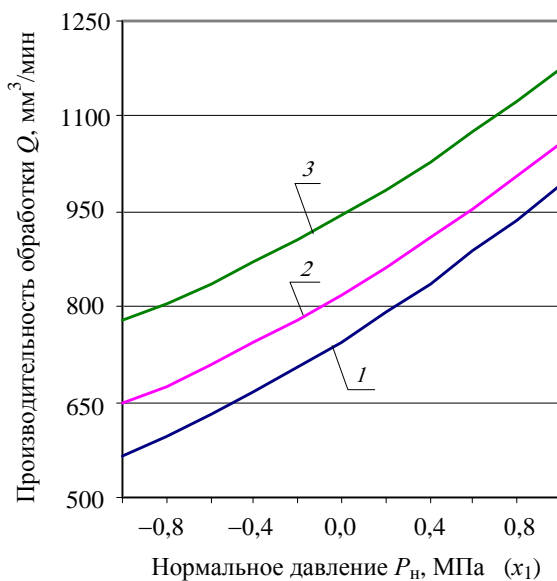


Рис. А.3. Влияние P_n на Q : $V = 25$ м/с; $\kappa = 4$;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

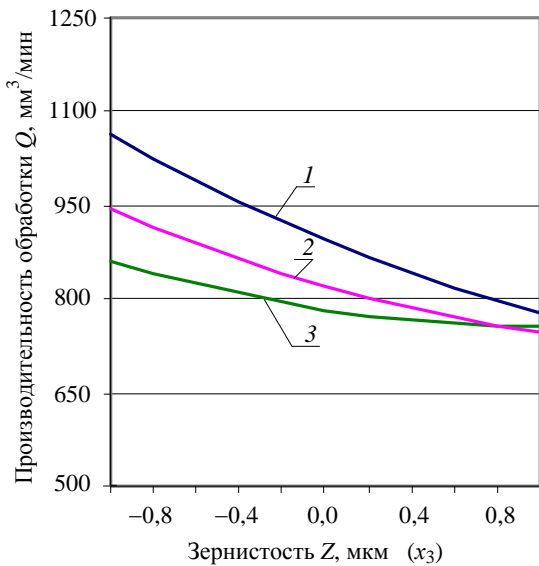


Рис. А.4. Влияние Z на Q : $V = 25$ м/с; $\kappa = 4$;
 1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

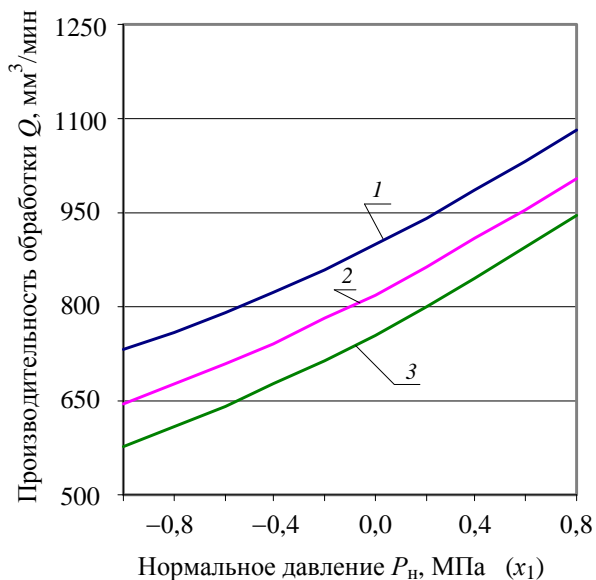


Рис. А.5. Влияние P_n на Q : $V = 25$ м/с; $Z = 100/80$;
 1 – $\kappa = 6$; 2 – $\kappa = 4$; 3 – $\kappa = 2$

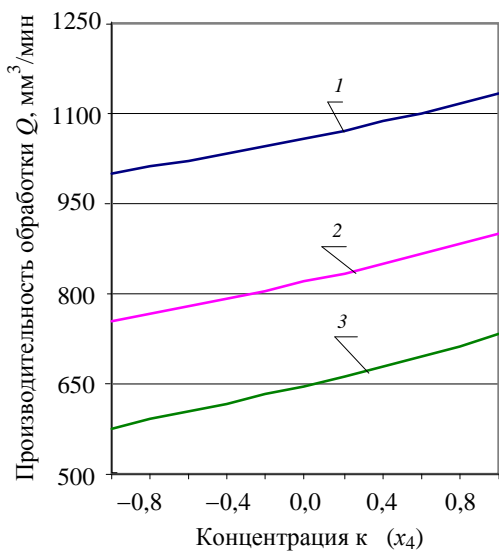


Рис. А.6. Влияние концентрации κ на Q : $V = 25$ м/с; $Z = 100/80$;
 1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

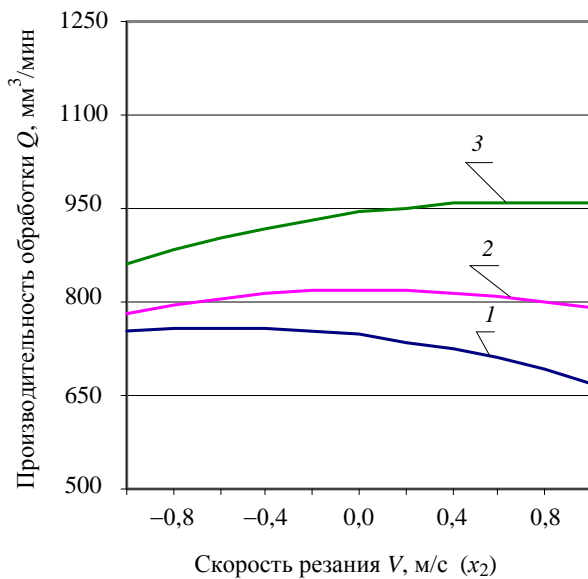


Рис. А.7. Влияние V на Q : $P_n = 1,2$ МПа; $\kappa = 4$;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

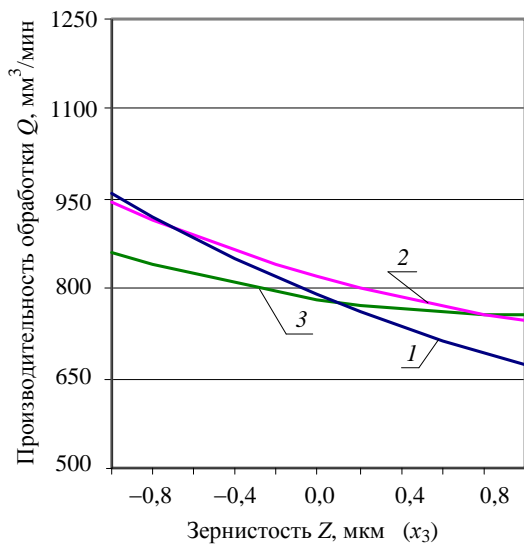


Рис. А.8. Влияние Z на Q : $P_n = 1,2$ МПа; $\kappa = 4$;
 1 – $V = 30$ м/с; 2 – $V = 25$ м/с; 3 – $V = 20$ м/с

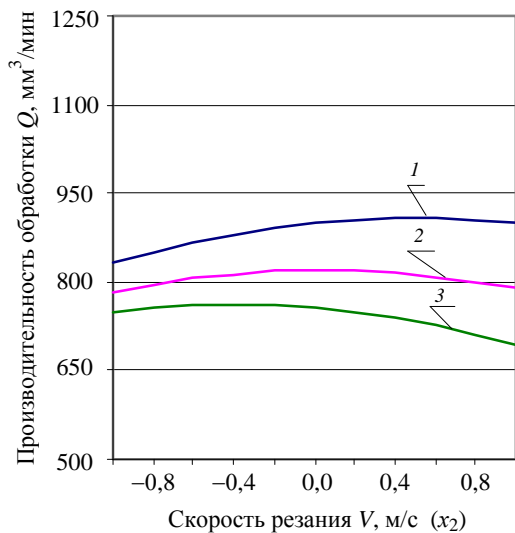


Рис. А.9. Влияние V на Q : $P_n = 1,2$ МПа; $Z=100/80$;
 1 – $\kappa = 6$; 2 – $\kappa = 4$; 3 – $\kappa = 2$

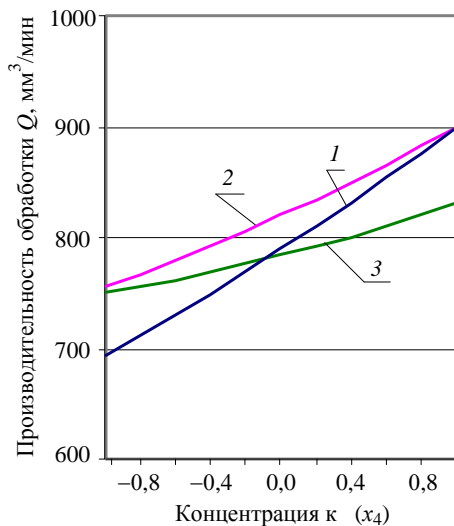


Рис. А.10. Влияние концентрации κ на Q : $P_n = 1,2$ МПа; $Z = 100/80$;
 1 – $V = 30$ м/с; 2 – $V = 25$ м/с; 3 – $V = 20$ м/с

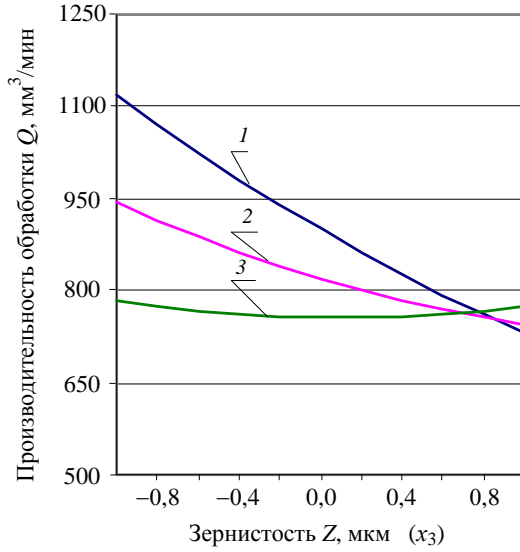


Рис. А.11. Влияние Z на Q : $P_n = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с;
 1 – $\kappa = 6$; 2 – $\kappa = 4$; 3 – $\kappa = 2$

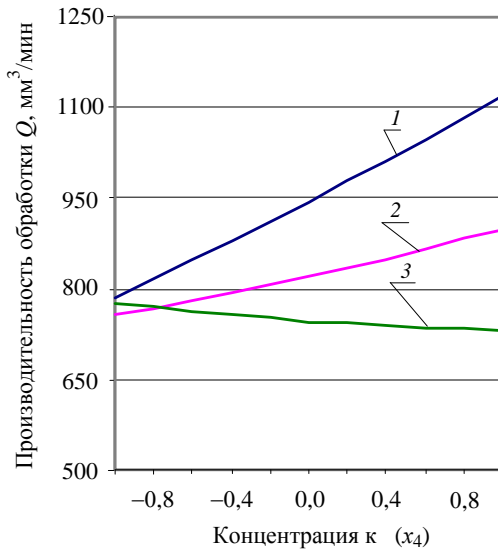


Рис. А.12. Влияние концентрации κ на Q : $P_n = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

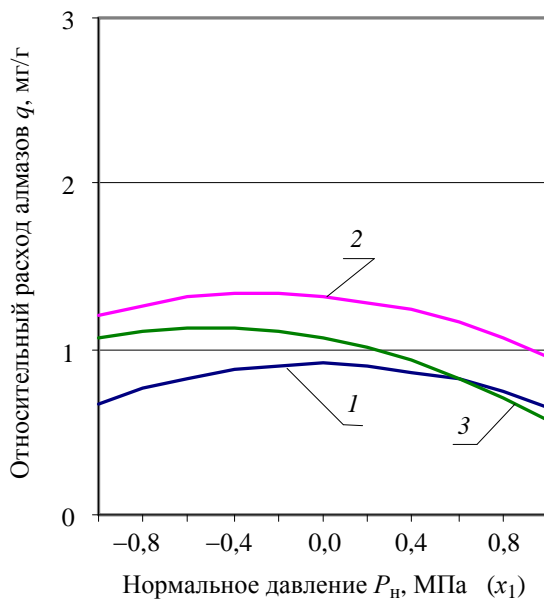


Рис. А.13. Влияние P_n на q : $Z = 100/80$; $\kappa = 4$;
 1 – $V = 30$ м/с; 2 – $V = 25$ м/с; 3 – $V = 20$ м/с

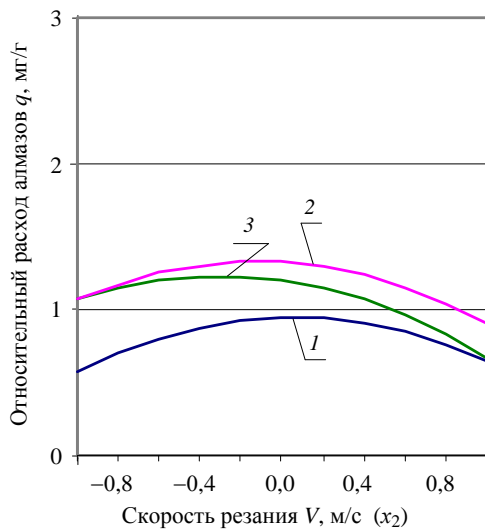


Рис. А.14. Влияние V на q : $Z=100/80$; $\kappa = 4$;
 1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

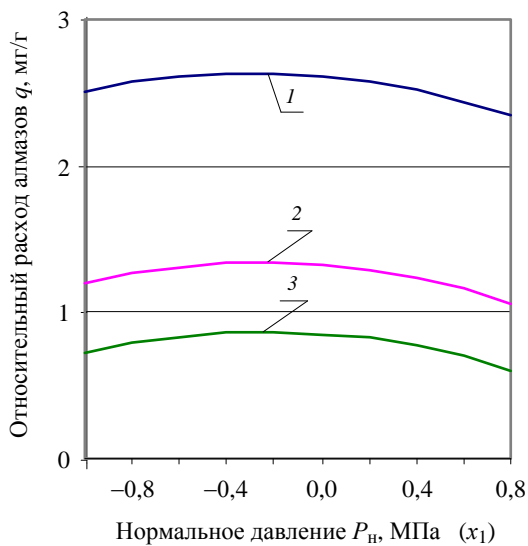


Рис. А.15. Влияние P_n на q : $V = 25$ м/с; $\kappa = 4$;
 $1 - Z = 160/125$; $2 - Z = 100/80$; $3 - Z = 50/40$

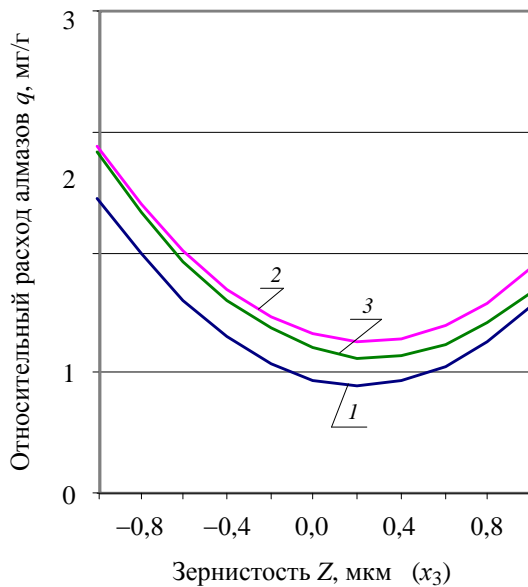


Рис. А.16. Влияние Z на q : $V = 25$ м/с; $\kappa = 4$;
 $1 - P_n = 1,6$ МПа; $2 - P_n = 1,2$ МПа; $3 - P_n = 0,8$ МПа

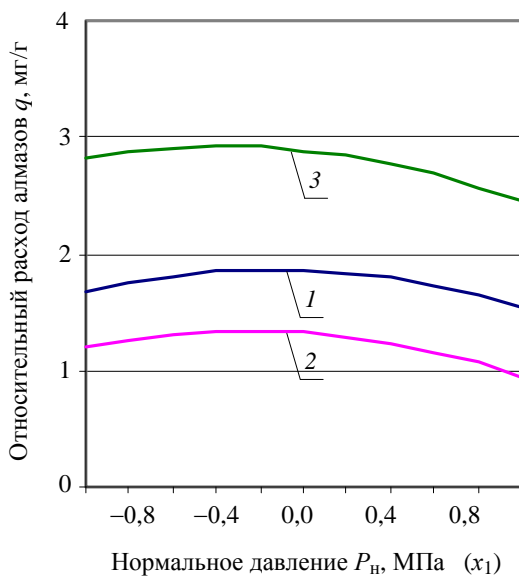


Рис. А.17. Влияние P_n на q : $V = 25$ м/с; $Z = 100/80$;
 $1 - k = 6$; $2 - k = 4$; $3 - k = 2$

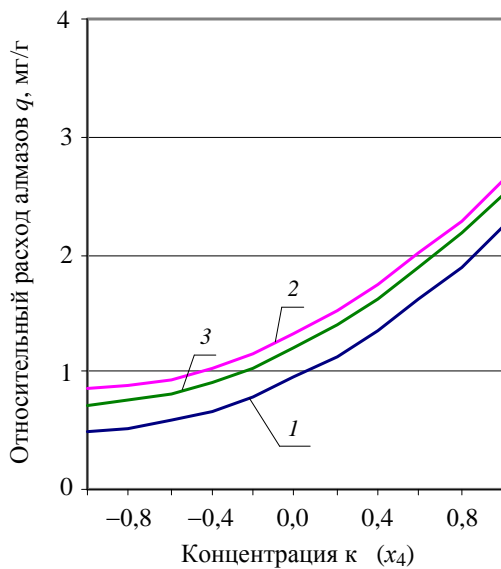


Рис. А.18. Влияние концентрации k на q : $V = 25$ м/с; $Z = 100/80$;
 $1 - P_n = 1,6$ МПа; $2 - P_n = 1,2$ МПа; $3 - P_n = 0,8$ МПа

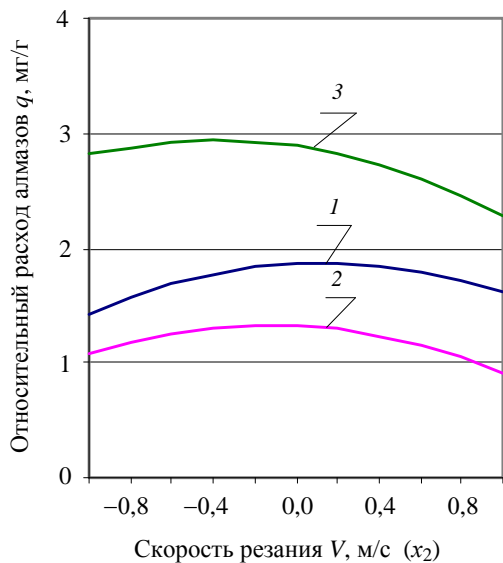


Рис. А.19. Влияние V на q : $P_n = 1,2$ МПа; $\kappa = 4$;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

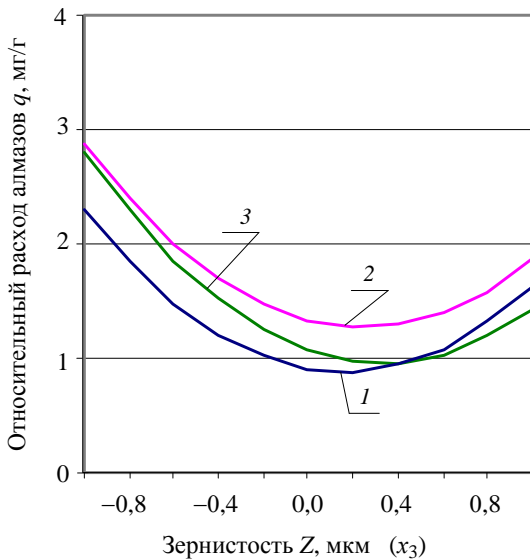


Рис. А.20. Влияние Z на q : $P_n = 1,2$ МПа; $\kappa = 4$;
 1 – $V = 30$ м/с; 2 – $V = 25$ м/с; 3 – $V = 20$ м/с

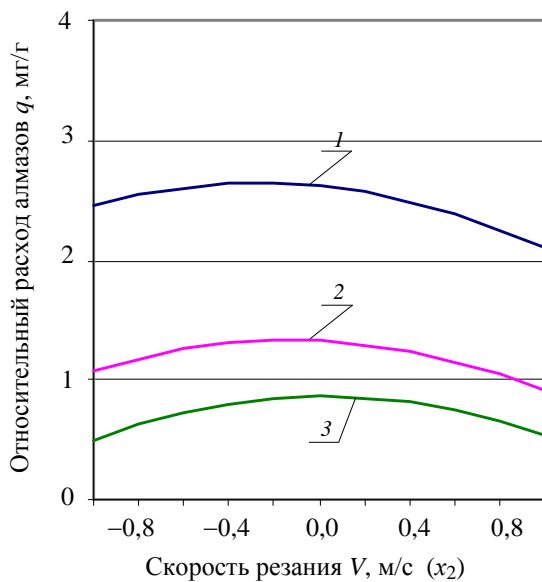


Рис. А.21. Влияние V на q : $P_n = 1,2$ МПа; $Z = 100/80$;
 $1 - k = 6$; $2 - k = 4$; $3 - k = 2$

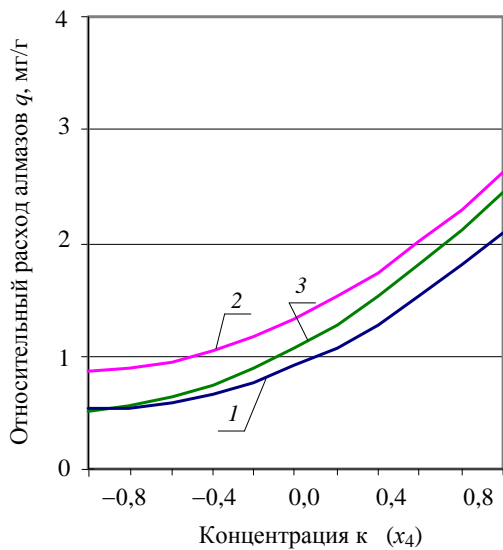


Рис. А.22. Влияние концентрации k на q : $P_n = 1,2$ МПа; $Z = 100/80$;
 $1 - V = 30$ м/с; $2 - V = 25$ м/с; $3 - V = 20$ м/с

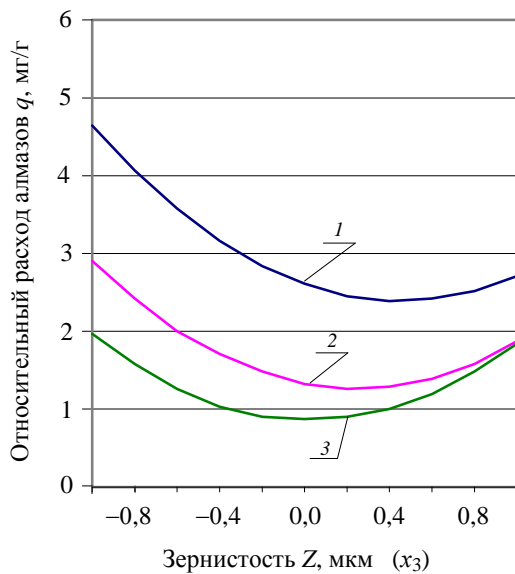


Рис. А.23. Влияние Z на q : $P_n = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с;
 1 – $k = 6$; 2 – $k = 4$; 3 – $k = 2$

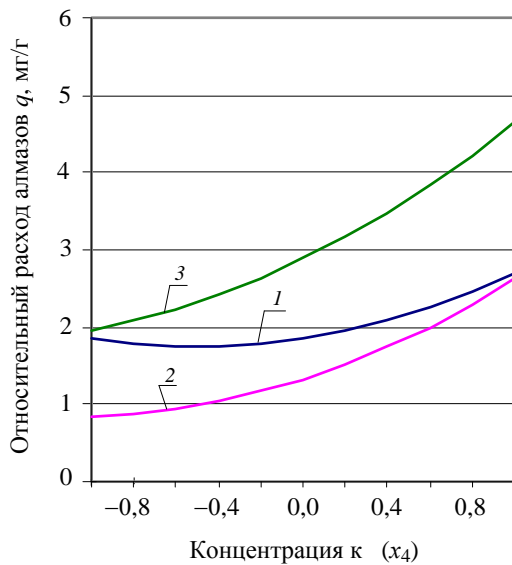


Рис. А.24. Влияние концентрации k на q : $P_n = 1,2$ МПа; $V = 25$ м/с;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

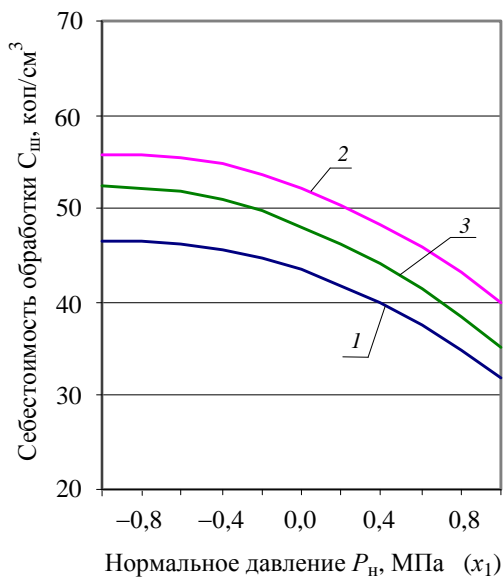


Рис. А.25. Влияние P_n на $C_{ш}$: $Z = 120(100/80)$; $\kappa = 4$;
 1 – $V = 30$ м/с; 2 – $V = 25$ м/с; 3 – $V = 20$ м/с

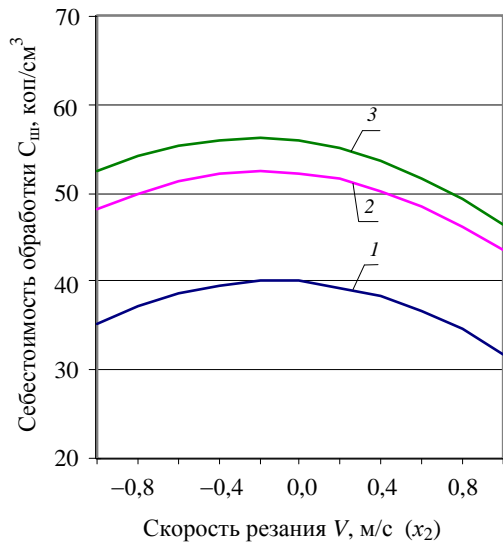


Рис. А.26. Влияние V на $C_{ш}$: $Z = 100/80$; $\kappa = 4$;
 1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

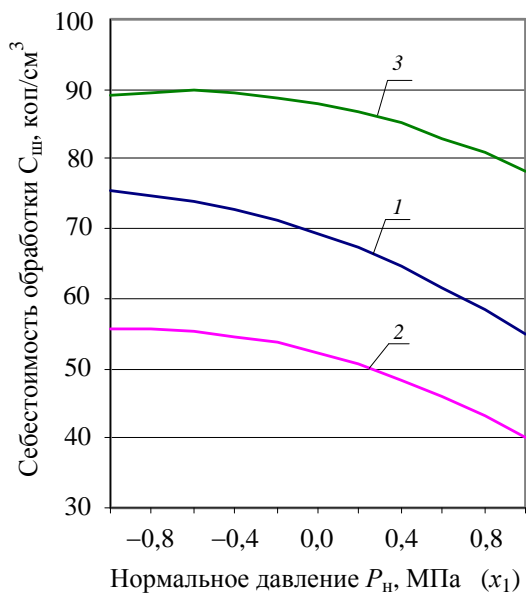


Рис. А.27. Влияние P_n на $C_{ш}$: $V = 25$ м/с; $\kappa = 4$;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

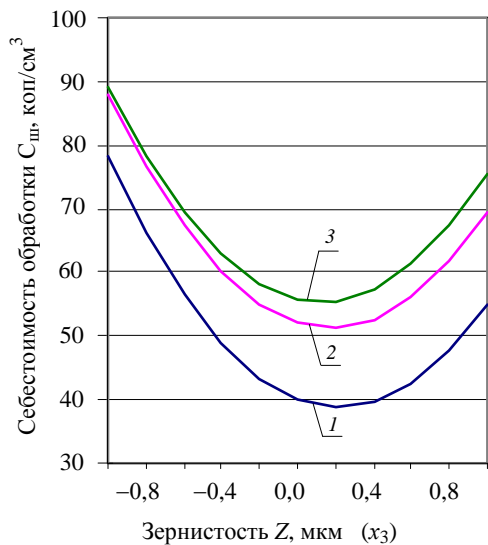


Рис. А.28. Влияние Z на $C_{ш}$: $V = 25$ м/с; $\kappa = 4$;
 1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

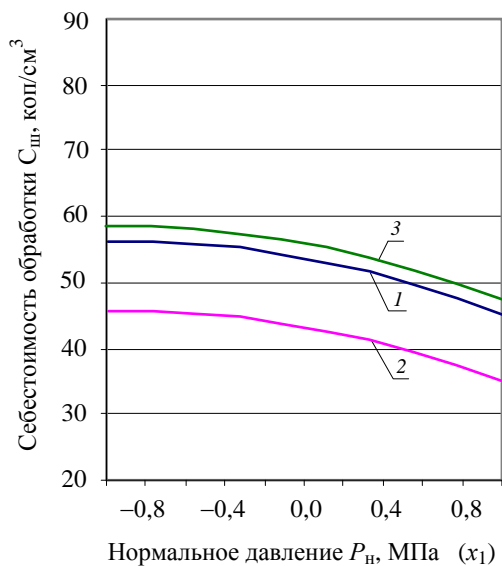


Рис. А.29. Влияние P_n на $C_{ш}$: $V = 25$ м/с; $Z = 100/80$;
 1 – $\kappa = 6$; 2 – $\kappa = 4$; 3 – $\kappa = 2$

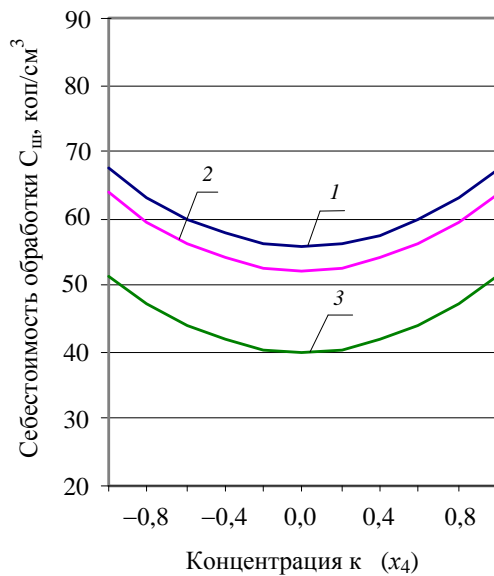


Рис. А.30. Влияние концентрации κ на $C_{ш}$: $V = 25$ м/с; $Z = 100/80$;
 1 – $P_n = 1,6$ МПа; 2 – $P_n = 1,2$ МПа; 3 – $P_n = 0,8$ МПа

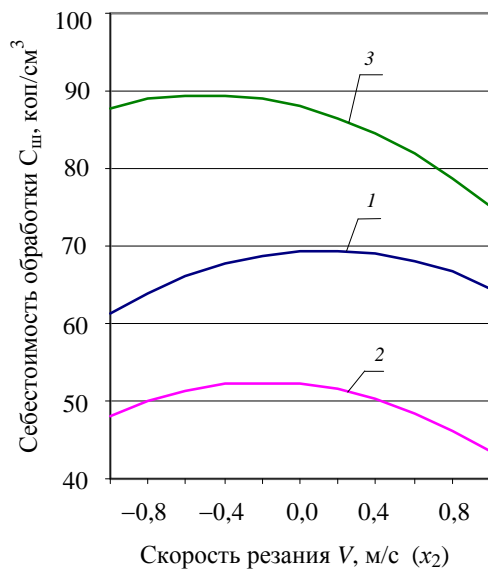


Рис. А.31. Влияние V на $C_{ш}$: $P_n = 1,2 \text{ МПа}$; $\kappa = 4$;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

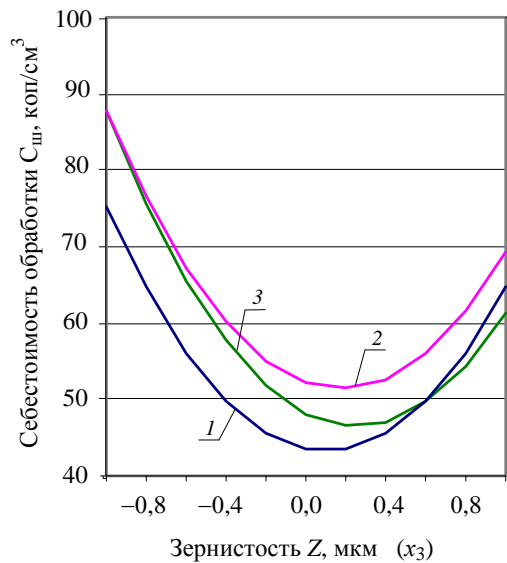


Рис. А.32. Влияние Z на $C_{ш}$: $P_n = 1,2 \text{ МПа}$; $\kappa = 4$;
 1 – $V = 30 \text{ м}/\text{с}$; 2 – $V = 25 \text{ м}/\text{с}$; 3 – $V = 20 \text{ м}/\text{с}$

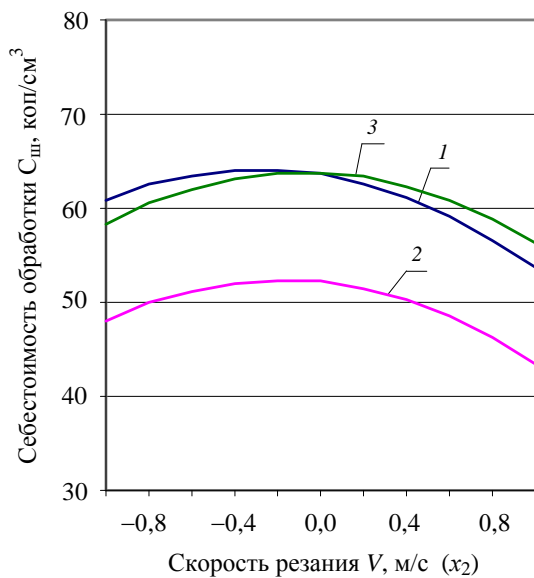


Рис. А.33. Влияние V на $C_{ш}$: $P_n = 1,2$ МПа; $Z = 100/80$;

$1 - \kappa = 6$; $2 - \kappa = 4$; $3 - \kappa = 2$

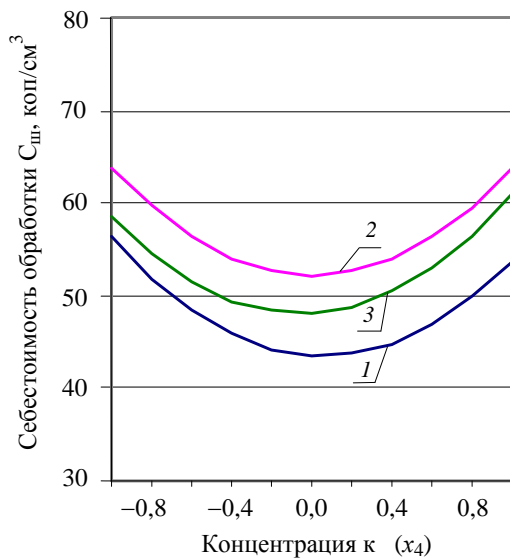


Рис. А.34. Влияние концентрации κ на $C_{ш}$: $P_n = 1,2$ МПа; $Z = 100/80$;

$1 - V = 30$ м/с; $2 - V = 25$ м/с; $3 - V = 20$ м/с

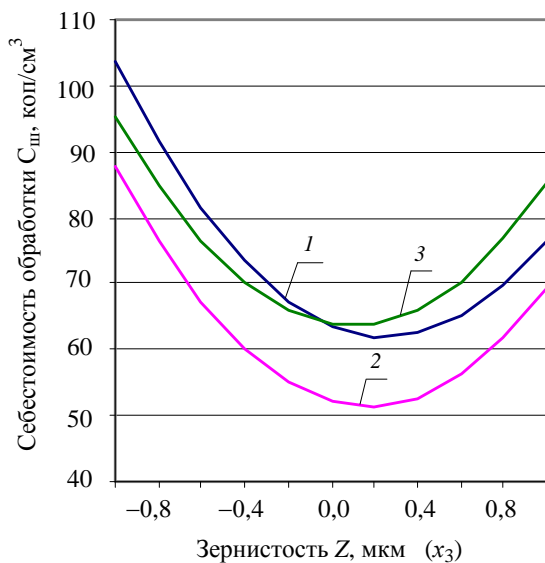


Рис. А.35. Влияние Z на $C_{ш}$: $P_H = 1,2 \text{ МПа}$; $V = 25 \text{ м/с}$;
 1 – $k = 6$; 2 – $k = 4$; 3 – $k = 2$

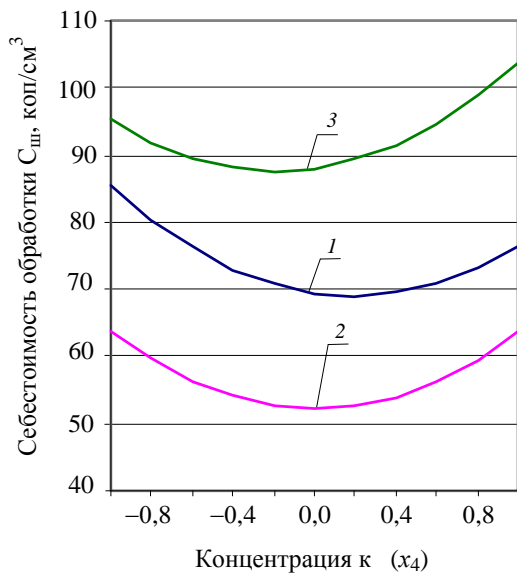


Рис. А.36. Влияние концентрации k на $C_{ш}$: $P_H = 1,2 \text{ МПа}$; $V = 25 \text{ м/с}$;
 1 – $Z = 160/125$; 2 – $Z = 100/80$; 3 – $Z = 50/40$

Таблица А.1

Влияние нормального давления и скорости резания на производительность обработки

		Нормальное давление P_H , МПа (x_1)												
	Скорость резания V , м/с (x_2)	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
		1,0	604,1	635,9	670,3	707,3	746,9	789,1	834,0	881,5	931,6	984,3	1039,6	
0,8	618,0	649,3	683,3	719,8	759,0	800,7	845,1	892,2	941,8	994,0	1048,9			
0,6	629,2	660,1	693,5	729,6	768,3	809,6	853,6	900,1	949,3	1001,1	1055,5			
0,4	637,7	668,1	701,1	736,8	775,0	815,8	859,3	905,4	954,1	1005,4	1059,4			
0,2	643,6	673,5	706,0	741,2	779,0	819,3	862,3	908,0	956,2	1007,1	1060,6			
0,0	646,7	676,1	708,2	742,9	780,2	820,1	862,7	907,8	955,6	1006,0	1059,0			
-0,2	647,1	676,1	707,7	741,9	778,8	818,2	860,3	905,0	952,3	1002,7	1054,8			
-0,4	644,8	673,3	704,5	738,2	774,6	813,6	855,2	899,5	946,3	995,8	1047,9			
-0,6	639,8	667,8	698,5	731,8	767,8	806,3	847,4	891,2	937,6	986,6	1038,3			
-0,8	632,1	659,7	689,9	722,7	758,2	796,3	837,0	880,3	926,2	974,8	1025,9			
-1,0	621,7	648,8	678,6	710,9	745,9	783,6	823,8	866,6	912,1	960,2	1010,9			

Таблица А.2

Влияние нормального давления и зернистости кругов на производительность обработки

	Нормальное давление P_H , МПа (x_1)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
Зернистость Z , мкм (x_2)	1,0	565,7	596,6	630,0	666,2	704,9	746,2	790,2	836,8	886,0	937,8	992,2	
	0,8	577,9	608,5	641,7	677,5	716,0	757,0	800,7	847,0	895,9	947,5	1001,6	
	0,6	592,1	622,4	655,4	690,9	729,1	769,8	813,2	859,2	907,9	959,1	1013,0	
	0,4	608,3	638,3	671,0	706,2	744,1	784,6	827,7	873,5	921,8	972,8	1026,3	
	0,2	626,5	656,2	688,6	723,6	761,2	801,4	844,2	889,7	937,7	988,4	1041,7	
	0,0	646,7	676,1	708,2	742,9	780,2	820,1	862,7	907,8	955,6	1006,0	1059,0	
	-0,2	668,8	698,0	729,8	764,2	801,2	840,9	883,1	928,0	975,5	1025,6	1078,4	
	-0,4	693,0	721,8	753,4	787,5	824,2	863,6	905,6	950,2	997,4	1047,2	1099,7	
	-0,6	719,1	747,7	778,9	812,8	849,2	888,3	40,6	974,3	1021,3	1070,8	1123,0	
	-0,8	747,2	775,5	806,5	840,0	876,2	915,0	956,4	1000,4	1047,1	1096,4	1148,2	
	-1,0	777,3	805,3	836,0	869,3	905,2	943,7	984,8	1028,6	1074,9	1123,9	1175,5	

Влияние нормального давления и концентрации алмазов на производительность обработки

	Нормальное давление P_n , МПа (x_1)										
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1,0	731,6	759,9	790,9	824,5	860,7	899,6	941,0	985,1	1031,8	1081,1	1133,0
0,8	713,4	742,0	773,1	807,0	843,4	882,5	924,1	968,4	1015,3	1064,9	1117,0
0,6	695,8	724,6	756,0	790,0	826,7	866,0	907,9	952,4	999,5	1049,2	1101,6
0,4	678,8	707,8	739,5	773,7	810,6	850,1	892,2	936,9	984,3	1034,2	1086,8
0,2	662,4	691,7	723,5	758,0	795,1	834,8	877,1	922,1	969,6	1019,8	1072,6
0,0	646,7	676,1	708,2	742,9	780,2	820,1	862,7	907,8	955,6	1006,0	1059,0
-0,2	631,5	661,2	693,5	728,4	765,9	806,1	848,8	894,2	942,2	992,8	1046,1
-0,4	616,9	646,8	679,4	714,5	752,2	792,6	835,6	881,2	929,4	980,2	1033,7
-0,6	603,0	633,1	665,9	701,2	739,2	779,7	822,9	868,8	917,2	968,3	1021,9
-0,8	589,7	620,0	653,0	688,5	726,7	767,5	810,9	857,0	905,6	956,9	1010,8
-1,0	576,9	607,5	640,6	676,4	714,8	755,8	799,5	845,7	894,6	946,1	1000,2

Концентрация k (x_2)

Таблица А.4

Влияние скорости резания и зернистости кругов на производительность обработки

		Скорость резания V , м/с (x_2)										
		-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Зернистость Z , мкм (x_3)	1,0	754,4	758,2	759,3	757,6	753,3	746,2	736,5	724,0	708,9	691,0	670,5
	0,8	756,3	761,8	764,7	764,8	762,3	757,0	749,1	738,4	725,1	709,0	690,2
	0,6	760,1	767,5	772,1	774,1	773,3	769,8	763,7	754,8	743,2	729,0	712,0
	0,4	765,9	775,1	781,5	785,3	786,3	784,6	780,2	773,2	763,4	750,9	735,7
	0,2	773,8	784,7	792,9	798,4	801,3	801,4	798,8	793,5	785,5	774,8	761,4
	0,0	783,6	796,3	806,3	813,6	818,2	820,1	819,3	815,8	809,6	800,7	789,1
	-0,2	795,3	809,8	821,7	830,8	837,2	840,9	841,9	840,2	835,8	828,7	818,8
	-0,4	809,1	825,4	839,0	849,9	858,1	863,6	866,4	866,5	863,9	858,5	850,5
	-0,6	824,9	842,9	858,3	871,0	881,0	888,3	892,9	894,8	894,0	890,4	884,2
	-0,8	842,6	862,5	879,7	894,1	905,9	915,0	921,4	925,0	926,0	924,3	919,8
	-1,0	862,3	884,0	903,0	919,2	932,8	943,7	951,9	957,3	960,1	960,1	957,5

Таблица А.5

Влияние скорости резания и концентрации алмазов на производительность обработки

	Скорость резания V , м/с (x_2)										
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1,0	831,8	850,8	867,0	880,6	891,4	899,6	905,0	907,8	907,8	905,1	899,8
0,8	820,9	838,7	853,7	866,0	875,6	882,5	886,7	888,1	887,0	883,0	876,4
0,6	810,7	827,1	840,9	852,0	860,3	866,0	869,0	869,2	866,8	861,6	853,7
0,4	801,0	816,3	828,8	838,6	845,7	850,1	851,8	850,8	847,1	840,7	831,6
0,2	792,0	806,0	817,2	825,8	831,6	834,8	835,2	833,0	828,1	820,4	810,1
0,0	783,6	796,3	806,3	813,6	818,2	820,1	819,3	815,8	809,6	800,7	789,1
-0,2	775,7	787,2	796,0	802,0	805,4	806,1	804,0	799,3	791,8	781,7	768,8
-0,4	768,5	778,7	786,2	791,0	793,2	792,6	789,3	783,3	774,6	763,2	749,1
-0,6	761,9	770,9	777,1	780,7	781,6	779,7	775,2	768,0	758,0	745,4	730,0
-0,8	755,9	763,6	768,6	770,9	770,6	767,5	761,7	753,2	742,0	728,1	711,6
-1,0	750,5	756,9	760,7	761,8	760,2	755,8	748,8	739,1	726,6	711,5	693,7

Концентрация k (x_1)

Таблица А.6

Влияние зернистости кругов и концентрации алмазов на производительность обработки

	Зернистость Z, мкм (x3)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
1,0	1117,3	1069,8	1024,3	980,7	939,1	899,6	862,0	826,4	792,7	761,1	731,5		
0,8	1081,4	1037,6	995,9	956,1	918,3	882,5	848,6	816,8	787,0	759,1	733,2		
0,6	1046,0	1006,1	968,1	932,0	898,0	866,0	835,9	807,8	781,8	757,7	735,6		
0,4	1011,3	975,1	940,9	908,6	878,4	850,1	823,8	799,5	777,2	756,9	738,5		
0,2	977,2	944,7	914,3	885,8	859,3	834,8	812,3	791,7	773,2	756,6	742,1		
0,0	943,7	915,0	888,3	863,6	840,9	820,1	801,4	784,6	769,8	757,0	746,2		
-0,2	910,8	885,7	862,9	842,0	823,0	806,1	791,1	778,1	767,1	758,0	751,0		
-0,4	878,5	857,3	838,2	821,1	805,8	792,6	781,4	772,2	764,9	759,6	756,4		
-0,6	846,8	829,4	814,0	800,6	789,2	779,7	772,3	766,8	763,4	761,9	762,4		
-0,8	815,7	802,1	790,4	780,8	773,2	767,5	763,8	762,1	762,4	764,7	768,9		
-1,0	785,2	775,3	767,5	761,6	757,7	755,8	755,9	758,0	762,1	768,1	776,1		

Концентрация К (x4)

Таблица А.7

Влияние нормального давления и скорости резания на относительный расход алмазов

	Нормальное давление P_H , МПа (x_1)													
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0			
1,0	0,67	0,76	0,82	0,87	0,90	0,91	0,90	0,86	0,81	0,74	0,65			
0,8	0,83	0,91	0,97	1,02	1,04	1,04	1,03	0,99	0,94	0,86	0,76			
0,6	0,96	1,04	1,10	1,14	1,16	1,15	1,13	1,09	1,03	0,95	0,85			
0,4	1,07	1,14	1,20	1,23	1,24	1,24	1,21	1,17	1,10	1,01	0,91			
0,2	1,15	1,22	1,27	1,30	1,31	1,30	1,26	1,21	1,14	1,05	0,94			
0,0	1,20	1,27	1,31	1,34	1,34	1,32	1,30	1,23	1,16	1,06	0,95			
-0,2	1,23	1,29	1,33	1,35	1,35	1,33	1,30	1,23	1,15	1,05	0,93			
-0,4	1,23	1,28	1,32	1,33	1,33	1,30	1,30	1,19	1,11	1,00	0,88			
-0,6	1,20	1,25	1,28	1,29	1,23	1,25	1,20	1,13	1,04	0,93	0,80			
-0,8	1,15	1,19	1,22	1,22	1,21	1,17	1,20	1,04	0,95	0,84	0,70			
-1,0	1,07	1,11	1,13	1,13	1,11	1,07	1,01	0,93	0,83	0,71	0,57			

Скорость резания V , м/с (x_2)

Таблица А.8

Влияние нормального давления и зернистости кругов на относительный расход алмазов

	Нормальное давление P_H , МПа (x_1)										
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1,0	1,68	1,76	1,81	1,85	1,87	1,86	1,84	1,80	1,73	1,65	1,55
0,8	1,42	1,49	1,54	1,58	1,59	1,59	1,56	1,52	1,45	1,37	1,26
0,6	1,24	1,31	1,36	1,39	1,40	1,39	1,37	1,32	1,25	1,16	1,06
0,4	1,14	1,21	1,26	1,30	1,30	1,29	1,26	1,21	1,14	1,05	0,94
0,2	1,13	1,20	1,24	1,27	1,28	1,26	1,23	1,18	1,10	1,01	0,90
0,0	1,20	1,27	1,31	1,34	1,34	1,32	1,30	1,23	1,16	1,06	0,95
-0,2	1,36	1,42	1,46	1,48	1,49	1,47	1,43	1,37	1,30	1,20	1,08
-0,4	1,60	1,66	1,70	1,72	1,72	1,70	1,66	1,60	1,52	1,41	1,29
-0,6	1,93	1,98	2,02	2,04	2,03	2,01	2,07	1,90	1,82	1,72	1,59
-0,8	2,34	2,39	2,42	2,44	2,43	2,41	2,36	2,30	2,21	2,10	1,98
-1,0	2,83	2,88	2,91	2,92	2,91	2,89	2,84	2,77	2,68	2,58	2,45

Зернистость Z, мкм (x_2)

Таблица А.9

Влияние нормального давления и концентрации алмазов на относительный расход алмазов

Концентрация (x_2)		Нормальное давление P_H , МПа (x_1)											
		-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
1,0	2,51	2,57	2,61	2,63	2,63	2,61	2,58	2,52	2,44	2,34	2,22		
0,8	2,18	2,24	2,29	2,3	2,31	2,29	2,25	2,20	2,12	2,02	1,90		
0,6	1,89	1,95	1,99	2,01	2,02	2,00	1,96	1,90	1,83	1,73	1,61		
0,4	1,63	1,69	1,73	1,76	1,76	1,74	1,70	1,65	1,57	1,47	1,36		
0,2	1,40	1,46	1,51	1,53	1,53	1,52	1,48	1,42	1,35	1,25	1,14		
0,0	1,20	1,27	1,31	1,34	1,34	1,32	1,29	1,23	1,16	1,06	0,95		
-0,2	1,04	1,10	1,15	1,17	1,18	1,16	1,13	1,07	1,00	0,91	0,80		
-0,4	0,91	0,98	1,02	1,05	1,05	1,04	1,00	0,95	0,88	0,78	0,67		
-0,6	0,81	0,88	0,93	0,95	0,96	0,94	0,91	0,86	0,78	0,69	0,58		
-0,8	0,75	0,82	0,86	0,89	0,90	0,89	0,85	0,80	0,72	0,63	0,52		
-1,0	0,72	0,79	0,83	0,86	0,87	0,86	0,82	0,77	0,7	0,61	0,49		

Влияние скорости резания и зернистости кругов на относительный расход алмазов

	Скорость резания V , м/с (x_2)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
1,0	1,43	1,57	1,68	1,77	1,83	1,86	1,87	1,85	1,80	1,73	1,63		
0,8	1,19	1,32	1,43	1,51	1,56	1,59	1,59	1,56	1,50	1,42	1,31		
0,6	1,03	1,16	1,26	1,33	1,38	1,39	1,39	1,35	1,29	1,20	1,09		
0,4	0,96	1,08	1,17	1,24	1,28	1,29	1,27	1,23	1,16	1,07	0,94		
0,2	0,97	1,08	1,17	1,23	1,26	1,26	1,24	1,19	1,12	1,01	0,88		
0,0	1,07	1,17	1,25	1,30	1,33	1,32	1,29	1,24	1,15	1,04	0,91		
-0,2	1,25	1,35	1,42	1,46	1,48	1,47	1,43	1,37	1,28	1,16	1,02		
-0,4	1,51	1,60	1,67	1,70	1,71	1,70	1,65	1,58	1,48	1,36	1,21		
-0,6	1,86	1,95	2,00	2,03	2,03	2,01	1,96	1,88	1,78	1,64	1,49		
-0,8	2,29	2,37	2,42	2,44	2,44	2,41	2,35	2,26	2,15	2,01	1,84		
-1,0	2,81	2,88	2,92	2,94	2,93	2,89	2,82	2,73	2,61	2,46	2,29		

Зернистость Z , $\mu\text{м}$ (x_3)

Таблица А.11

Влияние скорости резания и концентрации алмазов на относительный расход алмазов

		Скорость резания V , м/с (x_2)												
		-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
Концентрация k (x_1)	1,0	2,46	2,54	2,60	2,63	2,64	2,61	2,57	2,49	2,39	2,26	2,10		
	0,8	2,11	2,20	2,27	2,30	2,31	2,29	2,25	2,17	2,07	1,95	1,80		
	0,6	1,80	1,90	1,96	2,00	2,01	2,00	1,96	1,89	1,79	1,67	1,52		
	0,4	1,53	1,62	1,69	1,74	1,75	1,74	1,70	1,64	1,55	1,43	1,29		
	0,2	1,28	1,38	1,46	1,50	1,52	1,52	1,48	1,42	1,34	1,22	1,08		
	0,0	1,07	1,17	1,25	1,30	1,33	1,32	1,29	1,24	1,15	1,04	0,91		
	-0,2	0,89	1,00	1,08	1,13	1,16	1,16	1,14	1,09	1,01	0,90	0,77		
	-0,4	0,74	0,86	0,94	1,00	1,03	1,04	1,02	0,97	0,89	0,79	0,66		
	-0,6	0,63	0,75	0,84	0,90	0,93	0,94	0,93	0,88	0,81	0,71	0,59		
	-0,8	0,55	0,67	0,76	0,83	0,87	0,88	0,87	0,83	0,76	0,67	0,55		
-1,0	0,50	0,63	0,72	0,79	0,84	0,86	0,84	0,81	0,75	0,65	0,54			

Таблица А.12

Влияние зернистости кругов и концентрации алмазов на относительный расход алмазов

		Зернистость Z, мкм (x3)										
		-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Концентрация К (x4)	1,0	4,64	4,06	3,58	3,17	2,85	2,61	2,46	2,39	2,41	2,51	2,69
	0,8	4,22	3,67	3,20	2,81	2,51	2,29	2,16	2,11	2,14	2,26	2,46
	0,6	3,84	3,30	2,85	2,48	2,20	2,00	1,88	1,85	1,91	2,04	2,26
	0,4	3,49	2,97	2,54	2,19	1,92	1,74	1,64	1,63	1,70	1,86	2,10
	0,2	3,17	2,67	2,26	1,93	1,68	1,52	1,44	1,44	1,53	1,71	1,96
	0,0	2,89	2,41	2,01	1,70	1,47	1,32	1,26	1,29	1,39	1,59	1,86
	-0,2	2,64	2,17	1,79	1,50	1,29	1,16	1,12	1,16	1,29	1,50	1,80
	-0,4	2,42	1,97	1,61	1,34	1,15	1,04	1,01	1,07	1,22	1,45	1,76
	-0,6	2,23	1,81	1,46	1,21	1,03	0,94	0,94	1,02	1,18	1,43	1,76
	-0,8	2,08	1,67	1,35	1,11	0,95	0,88	0,90	0,99	1,17	1,441	1,79
	-1,0	1,96	1,57	1,26	1,04	0,91	0,86	0,89	1,00	1,20	1,49	1,85

Таблица А.13

Влияние нормального давления и скорости резания на удельную себестоимость обработки

		Нормальное давление P_n , МПа (x_1)										
Скорость резания V , м/с (x_2)		-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	1,0	46,46	46,55	46,29	45,70	44,76	43,47	41,84	39,87	37,56	34,90	31,90
0,8	49,36	49,42	49,14	48,52	47,55	46,24	44,59	42,59	40,25	37,56	34,54	
0,6	51,74	51,78	51,47	50,82	49,83	48,49	46,82	44,79	42,43	39,72	36,66	
0,4	53,61	53,63	53,29	52,62	51,60	50,24	48,53	46,49	44,09	41,36	38,28	
0,2	54,97	54,96	54,60	53,90	52,86	51,47	49,74	47,67	45,25	42,49	39,38	
0,0	55,82	55,78	55,40	54,67	53,61	52,19	50,44	48,34	45,89	43,10	39,98	
-0,2	56,16	56,09	55,69	54,93	53,84	52,40	50,62	48,49	46,02	43,21	40,06	
-0,4	55,98	55,89	55,46	54,68	53,56	52,10	50,29	48,14	45,64	42,81	39,62	
-0,6	55,30	55,18	54,72	53,92	52,77	51,28	49,45	47,27	44,75	41,89	38,68	
-0,8	54,10	53,96	53,47	52,64	51,47	49,96	48,10	45,89	43,35	40,46	37,23	
-1,0	52,40	52,22	51,71	50,86	49,66	48,12	46,23	44,00	41,43	38,52	35,26	

Таблица А.14

Влияние нормального давления и зернистости кругов на удельную себестоимость обработки

	Нормальное давление $P_{\text{н}}$, МПа (x_1)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
Зернистость Z , мкм (x_2)	1,0	75,41	74,90	74,04	72,84	71,30	69,41	67,18	64,61	61,70	58,43	54,83	
	0,8	67,25	66,84	66,07	64,97	63,52	61,73	59,60	57,12	54,30	51,13	47,62	
	0,6	61,22	60,89	60,23	59,22	57,86	56,17	54,13	51,74	49,02	45,94	42,53	
	0,4	57,30	57,07	56,50	55,58	54,33	52,72	50,78	48,49	45,86	42,88	39,56	
	0,2	55,50	55,37	54,89	54,07	52,91	51,40	49,55	47,35	44,81	41,93	38,71	
	0,0	55,82	55,78	55,40	54,67	53,61	52,19	50,44	48,34	45,89	43,11	39,98	
	-0,2	58,26	58,32	58,03	57,40	56,42	55,11	53,44	51,44	49,09	46,40	43,36	
	-0,4	62,82	62,97	62,78	62,24	61,36	60,14	58,57	56,66	54,41	51,81	48,87	
	-0,6	69,50	69,74	69,64	69,20	68,42	67,29	64,00	61,84	59,34	56,49		
	-0,8	78,29	78,63	78,63	78,28	77,59	76,56	75,18	73,46	71,39	68,99	66,23	
-1,0	89,21	89,64	89,73	89,48	88,89	87,95	86,66	85,04	83,07	80,75	78,10		

Таблица А.15

Влияние нормального давления и концентрации алмазов на удельную себестоимость обработки

Концентрация (x_2)	Нормальное давление $F_{н}$, МПа (x_1)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
1,0	67,23	67,20	66,83	66,12	65,06	63,66	61,91	59,82	57,39	54,61	51,50		
0,8	63,11	63,08	62,70	61,99	60,93	59,52	57,77	55,68	53,25	50,47	47,35		
0,6	59,90	59,87	59,49	58,78	57,71	56,31	54,56	52,46	50,03	47,25	44,12		
0,4	57,62	57,59	57,21	56,49	55,42	54,01	52,26	50,17	47,73	44,94	41,82		
0,2	56,26	56,22	55,84	55,12	54,05	52,64	50,89	48,79	46,35	43,56	40,44		
0,0	55,82	55,78	55,40	54,67	53,61	52,19	50,44	48,34	45,90	43,11	39,98		
-0,2	56,31	56,26	55,88	55,15	54,08	52,66	50,91	48,80	46,36	43,57	40,44		
-0,4	57,71	57,67	57,28	56,55	55,48	54,06	52,30	50,19	47,75	44,95	41,82		
-0,6	60,04	59,99	59,60	58,87	57,79	56,37	54,61	52,50	50,05	47,26	44,12		
-0,8	63,29	63,24	62,85	62,11	61,03	59,61	57,85	55,74	53,29	50,49	47,35		
-1,0	67,46	67,41	67,01	66,27	65,19	63,77	62,00	59,89	57,44	54,64	51,50		

Таблица А.16

Влияние скорости резания и зернистости кругов на удельную себестоимость обработки

	Скорость резания V , м/с (x_2)													
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0			
1,0	61,36	64,00	66,12	67,73	68,83	69,41	69,49	69,05	68,10	66,64	64,66			
0,8	54,48	56,95	58,91	60,36	61,30	61,73	61,65	61,05	59,94	58,32	56,19			
0,6	49,71	52,02	53,83	55,12	55,90	56,17	55,92	55,17	53,90	52,12	49,83			
0,4	47,06	49,22	50,86	51,99	52,61	52,72	52,32	51,41	49,98	48,04	45,59			
0,2	46,53	48,53	50,01	50,99	51,45	51,40	50,84	49,76	48,18	46,08	43,47			
0,0	48,12	49,96	51,28	52,10	52,40	52,19	51,47	50,24	48,50	46,24	43,47			
-0,2	51,82	53,50	54,67	55,33	55,47	55,11	54,23	52,83	50,93	48,52	45,59			
-0,4	57,65	59,17	60,18	60,68	60,66	60,14	59,10	57,55	55,49	52,91	49,83			
-0,6	65,60	66,96	67,81	68,15	67,97	67,29	66,09	64,38	62,16	59,43	56,18			
-0,8	75,6600	76,86	77,55	77,73	77,40	76,56	75,20	73,33	70,95	68,06	64,66			
-1,0	87,8404	88,89	89,42	89,44	88,95	87,95	86,43	84,40	81,87	78,81	75,25			

Зернистость Z , мкм (x_3)

Таблица А.17

Влияние скорости резания и концентрации алмазов на удельную себестоимость обработки

	Скорость резания V , м/с (x_2)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
1,0	60,85	62,43	63,51	64,07	64,12	63,66	62,68	61,20	59,20	56,69	53,67		
0,8	56,46	58,10	59,22	59,83	59,93	59,52	58,60	57,16	55,22	52,76	49,79		
0,6	52,99	54,68	55,85	56,52	56,67	56,31	55,43	54,05	52,15	49,74	46,82		
0,4	50,44	52,18	53,41	54,12	54,32	54,01	53,19	51,86	50,01	47,65	44,79		
0,2	48,82	50,61	51,88	52,65	52,90	52,64	51,87	50,59	48,79	46,49	43,67		
0,0	48,12	49,96	51,28	52,10	52,40	52,19	51,47	50,24	48,50	46,24	43,47		
-0,2	48,34	50,22	51,60	52,47	52,82	52,66	51,99	50,81	49,12	46,91	44,20		
-0,4	49,48	51,42	52,84	53,76	54,17	54,06	53,44	52,31	50,67	48,51	45,85		
-0,6	51,54	53,53	55,01	55,97	56,43	56,37	55,81	54,73	53,13	51,03	48,41		
-0,8	54,52	56,56	58,09	59,11	59,62	59,61	59,09	58,06	56,52	54,47	51,91		
-1,0	58,43	60,52	62,10	63,17	63,73	63,77	63,30	62,33	60,83	58,83	56,32		

Концентрация K (x_1)

Таблица А.18

Влияние зернистости кругов и концентрации алмазов на удельную себестоимость обработки

	Зернистость Z, мкм (x3)												
	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0		
Концентрация К (x4)	1,0	103,74	91,49	81,35	73,33	67,44	63,66	61,10	62,46	65,03	69,73	76,546	
	0,8	98,74	86,66	76,70	68,85	63,13	59,52	58,03	58,67	61,42	66,29	73,276	
	0,6	94,66	82,75	72,96	65,29	59,74	56,31	54,99	55,80	58,72	63,76	70,927	
	0,4	91,50	79,76	70,15	62,65	57,27	54,01	52,87	53,85	56,95	62,16	69,501	
	0,2	89,26	77,70	68,26	60,93	55,73	52,64	51,67	52,83	56,10	61,49	68,996	
	0,0	87,95	76,56	67,29	60,14	55,11	52,19	51,40	52,72	56,17	61,73	69,413	
	-0,2	87,55	76,34	67,24	60,26	55,40	52,66	52,04	53,54	57,16	62,90	70,751	
	-0,4	88,08	77,04	68,11	61,31	56,62	54,06	53,61	55,28	59,07	64,98	73,012	
	-0,6	89,53	78,66	69,91	63,28	58,77	56,37	56,10	57,94	61,91	67,99	76,194	
	-0,8	91,90	81,20	72,63	66,17	61,83	59,61	59,51	61,53	65,67	71,92	80,297	
	-1,0	95,19	84,67	76,27	69,98	65,82	63,77	63,84	66,03	70,34	76,77	85,323	

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ	5
1.1. Основные тенденции развития и перспективы применения технологии минимальной смазки	6
1.2. Общие условия проведения исследований	14
Выводы	16
Глава 2. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ С АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ	17
2.1. Обоснование состава твердого смазочного материала и его особенности	17
2.2. Определение электрических параметров алмазно-искрового шлифования	21
2.3. Анализ взаимосвязи режимов резания и характеристик кругов с электрическими параметрами в процессе АИШ	25
2.4. Исследование и анализ коэффициентов шлифования	28
2.5. Энергоемкость процесса шлифования	33
2.6. Состояние режущей поверхности и особенности износа алмазных кругов	38
Выводы	48
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ	50
3.1. Методика исследований	50
3.2. Планируемый эксперимент и его условия	58

3.3. Анализ работоспособности алмазных кругов	62
Выводы	75
Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ.....	77
4.1. Исследование шероховатости поверхности	77
4.2. Исследование остаточных напряжений	84
4.3. Сравнительный анализ инжиниринга качества при шлифовании с СОТС и с применением технологии минимальной смазки.....	89
Выводы	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	102

Наукове видання

Агу Коллинз Агу
УЗУНЯН Матвій Данилович
Руднєв Олександр Віталійович

**ШЛИФОВАНИЕ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ**

Монографія

Російською мовою

Відповідальний за випуск проф. О.М. Шелковий
Роботу до видання рекомендував проф. Крутиков Г.А.

В авторській редакції

План 2018 р., поз. 150

Підп.до друку 23.11.2018 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.
Наклад 100 прим. Зам. №1823 Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2