

Агу Коллинз, М. Н. Виноградный,
М. Д. Узунян, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭНЕРГОЕМКОСТИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МИНИМАЛЬНОЙ СМАЗКИ

Представлено результати дослідження енергоємності алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів із застосуванням технології мінімального змащення. Показано, що використання спеціального твердого мастильного матеріалу замість рідини поливом за рахунок адсорбційного ефекту забезпечує меншу енергоємність процесу шліфування.

Представлены результаты исследования энергоемкости алмазно-искрового шлифования твердых сплавов с применением технологии минимальной смазки. Показано, что использование специального твердого смазочного материала вместо жидкости поливом за счет адсорбционного эффекта обеспечивает меньшую энергоемкость процесса шлифования.

The results of the investigations of correlation between the residual stress and the wear resistance of tools from nanostructured hard alloys after diamond-spark grinding are presented. It is shown that the more values of compressive stress the less summed technological cost of treatment.

В практике металлообработки в настоящее время используются жидкие, газообразные и твердые смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС).

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

Наибольшее распространение в качестве твердых смазочных материалов получили графит, дисульфид молибдена, окислы и соли металлов, а также твердые органические соединения, такие, как углеводороды, воски, вещества жировой природы, полимерные материалы и др. [1].

Следует заметить, что если на некоторых механических операциях (точение, сверление) подобная технология в последнее время находит применение, то при обработке шлифованием вообще не рассматривается [2, 3].

Как известно, эффективное шлифование твердых 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 сухая смазка в виде экологически чистых ТСМ различных модификаций в необходимом количестве вместо полива жидкой 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 твердого сплава. Подобранный соответствующий состав ТСМ в виде столбика определенного сечения с помощью простого устройства с небольшим усилием прижимается и постоянно контактирует с рабочей поверхностью алмазного круга.

Роль сухой твердой смазки следует рассматривать не только как средство обеспечения процесса АИШ за счет 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 твердого тела под воздействием окружающей среды. В основе эффекта Ребиндера лежит адсорбция на поверхности твердого 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 ван-дер-ваальсовскими силами, обусловленными взаимодействием электромагнитных полей между атомами и молекулами СОТС и твердого тела. При химической адсорбции хемосорбционные пленки удерживаются на поверхности твердого 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 [4]. Это обстоятельство нами будет использовано при выборе оптимального состава ТСМ.

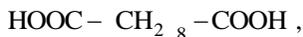
Наряду с повышением обрабатываемости материалов, базовые компоненты СОТС должны обеспечивать высокое смазывающее действие – снижать микросхватывание, задираание, фрикционный нагрев и силы трения в контактной зоне деталь – инструмент. Смазывающее действие СОТС осуществляется в результате образования на контактных поверхностях граничных пленок, которые экранируют поверхности трения. Граничная смазка обусловлена действием адсорбционно или химически связанной с трущейся поверхностью пленки.

Типичная граничная смазка – это смазка пленкой, образующейся в результате химического взаимодействия высших жирных кислот с ювенильной поверхностью металла. При этом продуктами реакции являются твердофазные 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 высшие 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 твердые насыщенные жирные кислоты и имеет температуру плавления 49–52 °С.

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 кислородсодержащим соединением (ПФКС).

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

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.).

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.

Для выбора рационального состава смеси ТСМ и оценки энергоемкости процесса шлифования были проведены экспериментальные исследования с помощью специальной установки на базе универсально-заточного станка 3Д642Е, модернизированного для реализации процесса АИШ; обрабатывались пластины твердого сплава Т15К6 сечением $18 \times 16 \times 6$ мм, а также эти же пластины совместно со сталью 45 при одинаковом соотношении площадей контакта с рабочей поверхностью круга. 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.

Сравнительный анализ показателей процесса производился для различных диэлектрических сред: СОТС струйным поливом и ТСМ.

Оценка результатов по критериям производительности Q_m , мм³/мин, относительному расходу алмазов q , мг/г и удельной себестоимости

C , коп/см³ показала, что в среднем на 15–20 % значения указанных критериев выгодно отличают АИШ с применением твердого смазочного материала, состоящего из смеси равных частей стеариновой и себациновой кислот (табл. 1).

Таблица 1 – Значения показателей работоспособности кругов при различных диэлектрических средах

Диэлектрическая среда	Производительность Q_M , мм ³ /мин	Относительный расход алмазов q , мг/г	Удельная себестоимость C , коп/см ³
СОТС, струйный полив	549, 8	1,76	6,92
Смесь равных частей стеариновой и себациновой кислот	638, 3	1,32	6,04

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

Удельная энергоемкость шлифования B_M определялась энергией (работой), затраченной на съем массы твердого сплава в единицу времени ΔM :

$$B_M = \frac{A}{\Delta M},$$

где A – работа, Дж; ΔM – масса, кг.

Работа шлифования (A) 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 энергоемкость процесса АИШ представлены в табл. 2. Во всем диапазоне изменения нормальных давлений значения B_M меньше для ТСМ по сравнению с СОТС поливом. Общая тенденция незначительного изменения показателя энергоемкости при увеличении нормального давления объясняется соответственно пропорциональным ростом производительности шлифования.

Таблица 2 – Влияние нормального давления на удельную энергоёмкость B_M , Дж/г·10³ при АИШ Т15К6

Диэлектрическая среда	Нормальное давление P_H , 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 ее на B_M , чем нормальное давление (рис. 1). С увеличением скорости B_M растет как при шлифовании с СОТС поливом, так и при использовании ТСМ; при этом интенсивность роста удельной энергоёмкости при шлифовании с введением в зону резания твердого смазочного материала значительно меньше, что можно объяснить более активной самозатачиваемостью режущего рельефа алмазного круга и соответственно большим съемом материала.

Возможности использования ТСМ наиболее эффективно могут проявиться при АИШ твердого 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 пленка надежно экранирует трущиеся поверхности.

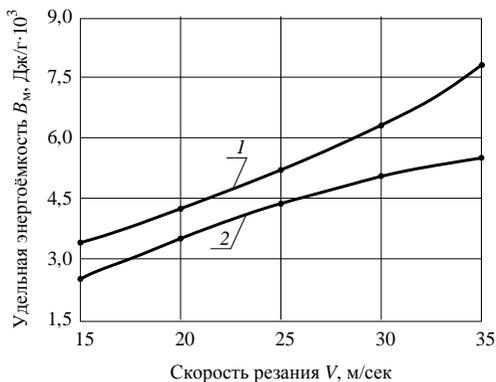


Рисунок 1 – Влияние скорости резания на энергоёмкость при АИШ:
1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ.

Условия шлифования: $P_H = 1,2$ МПа ; круг 12А2-45°АС6-100/80 М1-01-4.

Обрабатываемый материал: Т15К6

Последнее обстоятельство будет нивелировать диффузионное взаимодействие поверхности алмазных зерен со сталью в связи с известными положениями о средстве контактирующих материалов и перепаде концентраций углерода в них [5, 6], что вызывает повышенный износ кругов. Следует заметить, что при исследовании энергоемкости шлифования композиций различных материалов, отличающихся плотностью, более удобно пользоваться критерием, оценивающим удельную работу, затрачиваемую на объемный съем 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), однако применение ТСМ способствует меньшим значениям $A_{уд}$ во всем диапазоне изменения P_n .

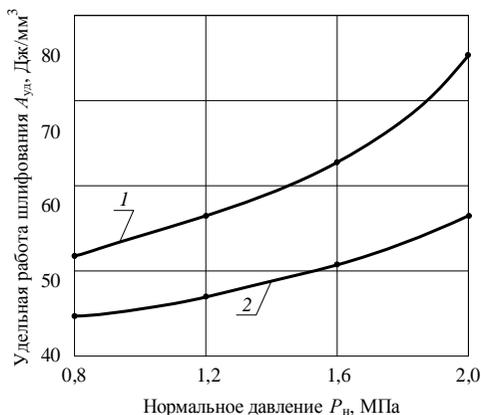


Рисунок 2 – Влияние нормального давления на удельную работу АИШ:

1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ.

Условия шлифования: $V = 25$ м/сек; круг 12А2-45°АС6-100/80 М1-01-4.

Обрабатываемый материал: Т15К6

Несмотря на то, что с рабочей поверхностью алмазного круга контактирует такая же, как и твердого 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. 3). Количественный фактор, характеризующий число встреч в единицу времени алмазных зерен 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 счет существенного повышения производительности шлифования, что способствует незначительному изменению энергоемкости и заметному снижению темпа ее роста; при этом шлифование с СОТС поливом вызывает довольно интенсивный рост $A_{уд}$, что свидетельствует о значительном отставании производительности шлифования от увеличивающейся работы резания.

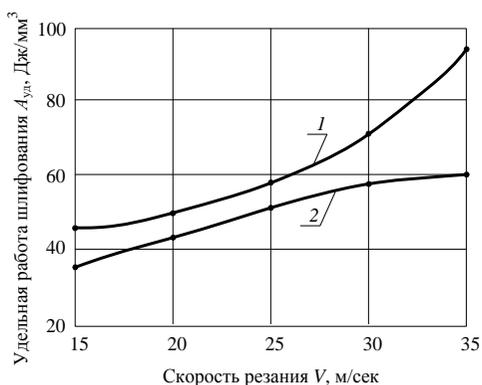


Рисунок 3 – Влияние скорости резания на удельную работу АИШ:
1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ.

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

Обрабатываемый материал: Т15К6 – ст45

Выявленное преимущество шлифования твердых сплавов, в том числе и композиции «твердый 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

карбокисильной 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 съем 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 надежное смачивание обнажаемой ювенильной поверхности – все 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 [7]. Поэтому, если ТСМ в связи с иницированием адсорбционных эффектов вызывает понижение свободной поверхностной энергии, то, естественно, должна уменьшаться хрупкая прочность твердых 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, 3).

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

Список использованных источников: 1. *Бердычевский Е. Г.* Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов : справочник / *Е. Г. Бердычевский*. – М. : Машиностроение, 1984. – 534 с. 2. *Старков В. К.* Шлифование высокопористыми кругами / *В. К. Старков*. – М. : Машиностроение, 2007. – 688 с. 3. *Якубов Ч. Ф.* Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / *Ч. Ф. Якубов*. – Симферополь : ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с. 4. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием : справочник / [ред. *С. Г. Энтелис*]. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с. 5. *Лоладзе Т. Н.* Износ алмазов и алмазных кругов / *Т. Н. Лоладзе, Г. В. Бокучава*. – М. : Машиностроение, 1967. – 112 с. 6. *Боуден Ф.* Трение и смазка твердых тел / *Ф. Боуден, Д. Тейбор*. – М. : Машиностроение, 1968. – 534 с. 7. *Шукин Е. Д.* Физико-химические основы новых методов интенсификации обработки твердых тел / *Е. Д. Шукин* // Физическая химия. Современные проблемы. – М. : Химия, 1983. – С. 30–40.

Поступила в редколлегию 07.04.2010