

Применение магнитных микрокапсул в качестве СОТС при резании материалов

Наумов А.Г., Латышев В.Н., доктора техн. наук

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей применения в качестве СОТС магнитных микрокапсул.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие технологические средства, резание материалов, микрокапсулы.

Application of Magnetic Microcapsules as Cutting Fluid while cutting of metal

A.G. Naumov, V.N. Latyshev, Doctors of Engineering

This article presents the results of theoretical and experimental researches of possibilities to apply the magnetic microcapsules as a cutting fluid.

Key words: cutting fluid tools, cutting of metal, microcapsules.

Микрокапсулы (МК) как носители веществ достаточно широко используются в мировой практике в таких отраслях, как химическая промышленность, медицина, сельское хозяйство (рис. 1).

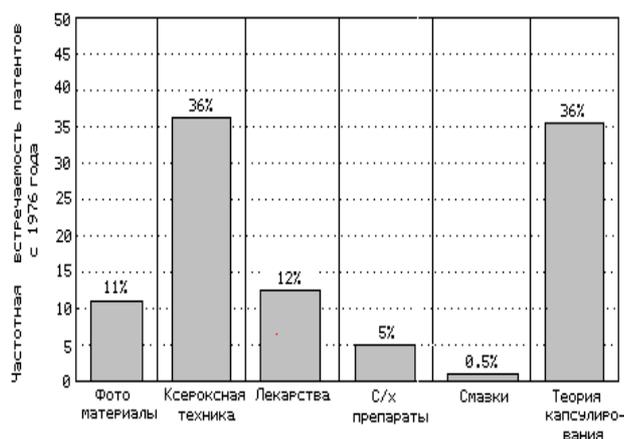


Рис. 1. Анализ патентной информации по применению микрокапсул в отраслях мировой промышленности с глубиной поиска 25 лет

В машиностроении основной областью использования МК являются операции обработки давлением [1]. О применении МК при резании сведения весьма ограниченные. Выявлено лишь два случая использования МК на операциях стружкоотделения [2, 3].

Причины, ограничивающие применение МК на операциях резания, по-видимому, обусловлены физико-механическими характеристиками их оболочек и поведением МК в СОТС в процессе резания. Так, невысокие температуры деструкции практикуемых желатиновых оболочек МК (75–80^oС) не позволяют им приближаться к зоне контакта на расстояния, которые необходимы для эффективного действия их ядра. С другой стороны, МК, находящиеся в жидком носителе, не имеют какого-либо явно выраженного направления перемещения, а подчиняются хаотичному броуновскому движению. Это приводит к вероят-

ностному характеру попадания МК в зону контакта. Совокупность этих причин нивелирует эффективность применения МК при резании и для получения положительных результатов требует значительного увеличения количества МК, что делает такую СОТС нерентабельной.

Ниже представлены результаты исследований по применению микрокапсулированных СОТС (МК СОТС) на операциях лезвийного резания, т.е. при подаче микродоз СОТС, каждая из которых окружена оболочкой из непроницаемого для него материала. Размеры МК варьировались в пределах от сотен нанометров до 30–50 мкм. Для повышения эффективности их действия в состав МК были дополнительно введены магниточувствительные компоненты, в качестве которых использовался магнетит Fe₃O₄ с размерами частиц ≈ 10 нм. В результате были получены магнитные микрокапсулы (ММК).

Концепция направленного движения ММК, имеющих в своем составе магнетит Fe₃O₄, основана на положении классической физики о том, что ферромагнитная частица при воздействии на нее магнитным полем ориентируется по полю и может иметь движение вдоль силовых линий этого поля.

Процессы, протекающие в зоне контакта (стружкоотделение, наличие СОТС, физические свойства материалов и др.) приводят к изменению силы тока. Эти колебания вызывают изменение во времени напряженности электрического поля, порожденного электрическим током, т.е. в зоне контакта существует переменное электрическое поле. Одновременно с этим в зоне резания постоянно присутствуют заряженные частицы (ионы, электроны, химические радикалы и др.). Наличие переменных электрических полей и заряженных частиц, согласно теории Максвелла, приводит к возбуждению магнитных полей, индукция которых может изменяться в широких пределах. Как следует из [4], действующая магнитная сила всегда направлена в области пространственной неоднородности магнитного поля, где максимально сконцентрирован выход магнитных силовых линий. Приме-

нительно к режущему инструменту такие области располагаются у вершины инструмента и на его режущих кромках.

В ряде работ установлено, что сила тока при резании колеблется в пределах от 4,5–5,0 [5, 6] до 10 А [7]. При подаче МК СОТС в жидком носителе на расстоянии порядка 3 мм от вершины резца магнитная индукция составит $B = 0,2$ мТл. С учетом относительной магнитной проницаемости материала режущего инструмента ($\mu = 200-5000$), величина магнитной индукции может возрасти до значений 40–1000 мТл.

Поступление МК в зону контакта будет наблюдаться лишь в том случае, если сила поля F_m , действующая на МК, превышает силу тяжести F_g . При массе капсулы $m \sim 3 \cdot 10^{-12}$ кг и приведенных выше величинах магнитной индукции имеем

$$F_m / F_g = F_m / mg \approx 49 - 126. \quad (1)$$

Таким образом, теория показывает, что сила, действующая со стороны поля на ММК, превышает в 49–126 раз силу тяжести, т.е. ММК будет двигаться в сторону зоны контакта под влиянием естественных электромагнитных полей.

Измерение магнитной составляющей электромагнитного поля, возникающего в процессе лезвийной обработки, производилось при точении. Регистрирующим элементом установки служила рамка с намотанным на нее проводом, которая использовалась как маятник, пересекающий магнитные силовые линии поля.

При проведении экспериментов период колебаний рамки составлял $\nu = 1 \text{ с}^{-1}$, ее площадь – $S = 4,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, число витков – $N = 20$. Исследования проводились после точения титанового сплава ВТ6 резцами из быстрорежущей стали Р6М5 при следующих режимах: $V = 0,15-0,50 \text{ м/с}$; $S = 0,10 \text{ мм/об}$; $t = 0,5 \text{ мм}$. При этом было установлено, что различные положения плоскости качения рамки приводили к результатам, значительно отличающимся друг от друга. Такое распределение величин ЭДС индукции указывало на резкую неоднородность магнитного поля в прирезцовой области, что вызвано, по-видимому, сложной геометрией поля.

Изучение влияния скорости резания на величину магнитной индукции B показало, что с увеличением скорости резания величина B возрастает нелинейно. Максимальные значения магнитной индукции отмечены при повышенных скоростях. Расчетами определено, что сила, действующая на ММК со средним размером 30 мкм, в 20–40 раз больше силы тяжести, т.е. достаточна для придания ММК направленного движения.

Направление движения ММК изучалось в статике посредством специально наведенного магнитного поля между двумя резцами, изготовленными из стали Р6М5, а также между резцом и обрабатываемым материалом (рис. 2). При этом установлено, что в обоих случаях ММК стремились именно к режущим кромкам резцов и выстраивались по силовым линиям магнитного по-

ля, протекающего по цепи «инструмент–инструмент» или «деталь–инструмент».

Для сравнения на рис. 2, в представлена фотография поведения ферромагнитной жидкости при тех же условиях эксперимента.

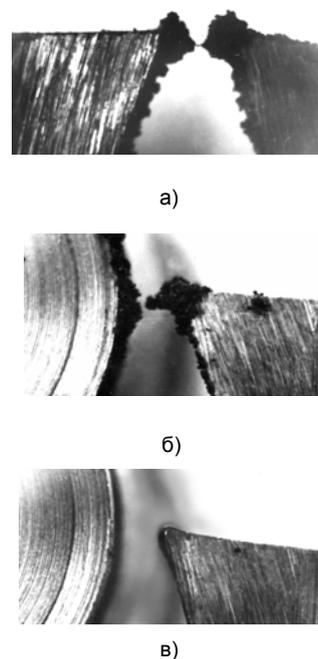
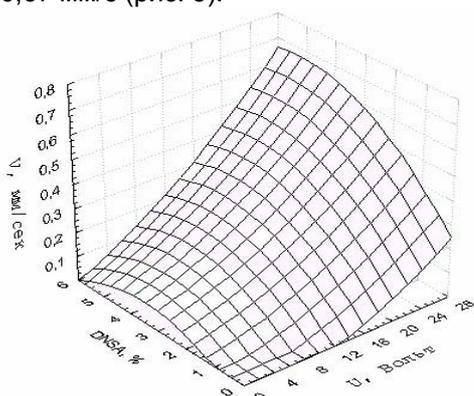


Рис. 2. Направление движения ММК в условиях наведенного магнитного поля при $B/r = 3,4 \text{ кТл/м}$: а – между двумя резцами из стали Р6М5; б – между резцом и поверхностью сплава ВТ6; в – поведение ферромагнитной жидкости на режущем клине резца Р6М5

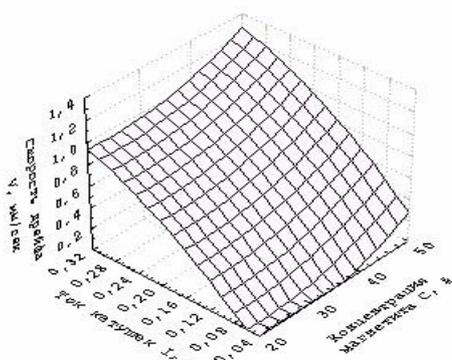
Изучение направления движения ММК в реальных условиях резания проводилось по внешнему виду рабочих поверхностей резцов после точения сплава ВТ6. Установлено, что при использовании 1%-ной суспензии ММК рабочие поверхности резца были покрыты слоем вещества, представляющего собой полимер оболочек ММК, подвергнутый термической деградации. Его количество увеличивалось по мере приближения к режущим кромкам, как по передней, так и по задним поверхностям. Максимум фиксировался вблизи вершины инструмента. Использование 4%-ной суспензии немагнитных МК (без магнетита) при аналогичных условиях резания приводило к появлению темных фрагментов только по передней поверхности, причем их распределение носит вероятностный характер.

Определение скорости дрейфа микрокапсул производилось с помощью ячейки Керра. Для придания ММК движения в электрических полях в состав жидкого носителя дополнительно вводилось поверхностно-активное вещество ДНСА в концентрации, не превышающей критическую концентрацию мицеллообразования. В этом случае на контакты ячейки подавалось напряжение в пределах от 0 до 26 В. При использовании постоянного магнитного поля, напряженность которого изменялась от 0 до 7545 А/м, его возбуждение осуществлялось посредством электромагнита.

Исследованиями установлено, что в электрическом поле скорость дрейфа ММК не превышала 0,67 мм/с (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Скорость движения ММК: а – в электрическом поле; б – в магнитном поле

При этом отмечено, что с увеличением концентрации ПАВ скорость перемещения МК может не только возрастать, но и несколько снижаться.

При управлении движением ММК магнитным полем концентрация магнетита в их составе и управляющий ток в катушках в равной степени влияли на скорость перемещения ММК. В этом случае максимальная скорость ММК более чем в 2 раза превысила предыдущее значение и зафиксирована на уровне 1,25–1,35 мм/с, причем движение МК наблюдалось уже при низких значениях токов (рис. 3,б).

Реальные процессы резания металлов сопровождаются значительными величинами температур и давлений в зоне контактирования, с одной стороны, а с другой – теория резания металлов не исключает существования областей пониженного давления. Кроме того, в обоих процессах постоянно присутствует взаимное перемещение контактирующих поверхностей. В связи с этим в настоящих исследованиях были обоснованы четыре основных механизма вскрытия МК: механический (разрушение оболочки вследствие механического воздействия); термический (тепловое разрушение оболочек); гетеробарический (разрушение оболочек при изменении внешнего

давления); диффузионный (истечение внутренней фазы через поры оболочек).

При изучении температур термического разрушения оболочек МК исследованиям были подвергнуты два вида МК: магнитные и немагнитные, заполненные индустриальным маслом И-40А и четыреххлористым углеродом CCl_4 . Количество МК, претерпевших термическое разрушение, определялось подсчетом видимых в микроскоп поврежденных или оплавившихся МК. Для сравнения, аналогичные исследования были проведены с МК с использованием в качестве носителя CCl_4 [8].

Исследованиями установлено, что состав внутренней фазы МК не оказывает влияния на значения теплостойкости их оболочек. Наличие в оболочке ММК магнетита также не приводило к изменению температур вскрытия, максимальные значения которых зафиксированы в области 200–225°C (рис. 4).

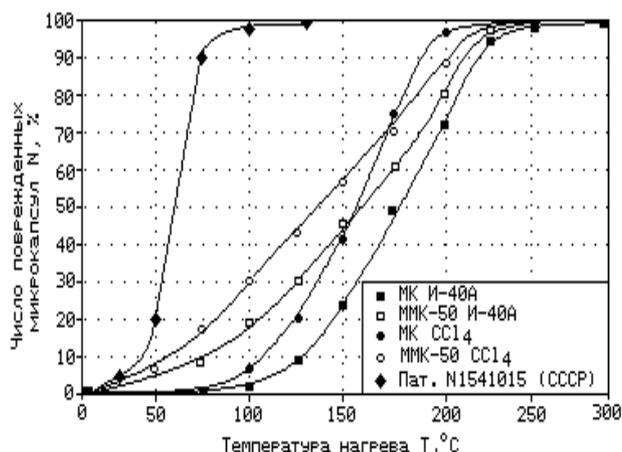


Рис. 4. Зависимость числа вскрытых МК от температуры их нагрева

Полученные значения более чем в 2 раза превысили температуры термодеструкции эталонных МК. Одинаковые условия при изготовлении МК и при проведении исследований позволили сделать вывод о том, что зафиксированные в экспериментах высокие температуры вскрытия МК обусловлены выбором дубящего вещества на стадии шивки оболочки МК при их изготовлении.

Имея невысокую теплопроводность полимерного материала оболочки, толщина которой около 3 мкм, и наличие направленного движения с некоторой скоростью, МК способны находиться некоторое время в областях, температура в которых значительно превосходит показанную выше температуру их термического разрушения. Проведенные расчеты показали, что изменение времени возможного пребывания МК при повышенных температурах подчиняется параболическому закону. Принимая во внимание величину средних температур, возникающих при резании быстрорежущим инструментом (около 600 °С), время существования ММК при этих температурах (0,4–0,5 с) и наличие у ММК направленного

движения, можно утверждать, что ММК за время своего пребывания в зоне резания при существующей технологии их подачи имеют возможность без разрушения приближаться непосредственно к режущим кромкам или вершине инструмента. Это экспериментально подтверждено данными, представленными на рис. 4.

Изучение поведения МК в условиях изменяющегося внешнего давления проводилось в два этапа: при повышенном внешнем давлении и при уменьшении внешнего давления.

При избыточном внешнем давлении исследования проводились в условиях изотермического одноосного сжатия.

При уменьшении внешнего давления одновременно оценивалось действие двух механизмов декапсулирования (рис. 5).

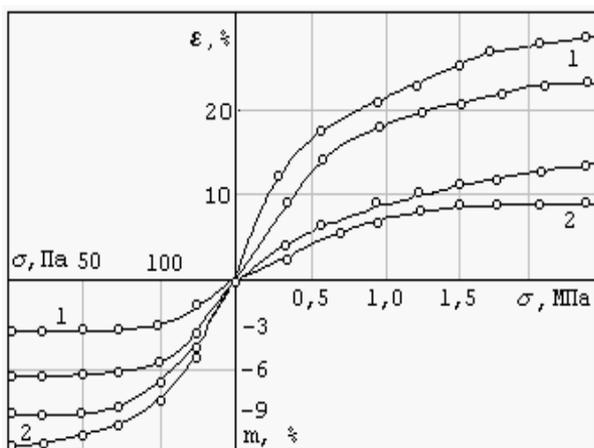


Рис. 5. Совмещенные результаты поведения МК при изменении внешнего давления

В результате проведенных исследований определены условия начала массового вскрытия МК, обусловленного прочностными характеристиками оболочек, и оценен вклад диффузионных процессов по высвобождению внутренней фазы. Установлено, что минимальное уменьшение массы капсул наблюдалось для ММК, содержащих индустриальное масло (рис. 5, кривые 1), а максимальное – для ММК с четыреххлористым углеродом (рис. 5, кривые 2).

На основе проведенных исследований предложена схема, отображающая проявление различных механизмов вскрытия МК (рис. 6).

На схеме области существования микрокапсул и возможных механизмов их декапсулирования представлены четкими границами. В реальных условиях таких границ не наблюдалось. Экспериментами определены расположенные вдоль линий ABC и DBE области вероятного существования и вскрытия МК. В этих областях механизмы декапсулирования проявлялись, как правило, в сложной форме – разрушение в результате одновременного действия нескольких механизмов.

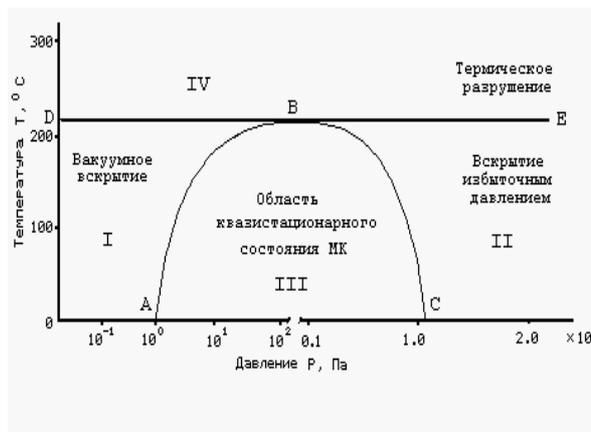


Рис. 6. Схема механизмов высвобождения внутренней фазы микрокапсул

Изучение характеристик процесса резания и стойкости инструментов в реальных условиях проводилось на операциях точения и сверления в лабораторных и производственных условиях. Микрокапсулы подавались в зону резания в виде суспензии в дистиллированной воде капельным методом.

Установлено, что применение МК СОТС с концентрацией ММК от 1,0 до 4,0 % (рис.7) способствует эффективному повышению стойкости режущих инструментов не только по сравнению с резанием всухую, но и при использовании стандартных водоземulsionных и масляных СОТС.

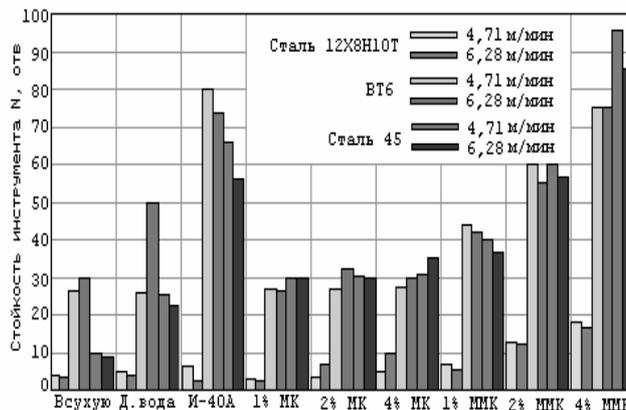
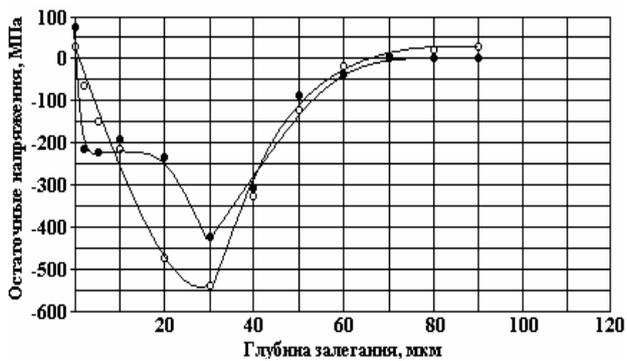
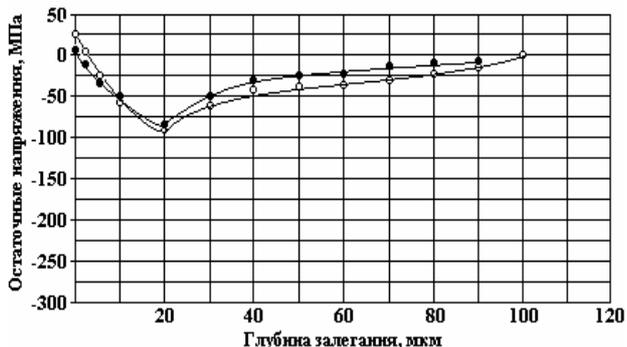


Рис. 7. Гистограмма стойкости сверл из БС Р6М5 при сверлении всухую и с применением СОТС

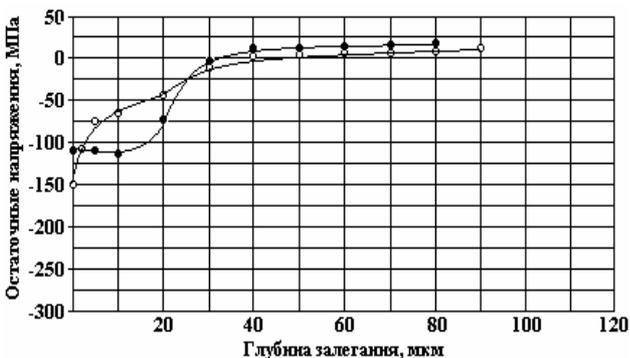
Дальнейшее увеличение количества ММК практически не оказывало заметного влияния на повышение работоспособности инструментов. Одним из основных параметров процесса резания является качество обработанных поверхностей, в частности величина и знак остаточных напряжений. Исследованиями, проведенными в производственных условиях ММП «Салют» [9], установлено, что применение ММК СОТС, по сравнению с другими СОТС, имеет показатели не хуже при высокой повторяемости результатов (рис. 8).



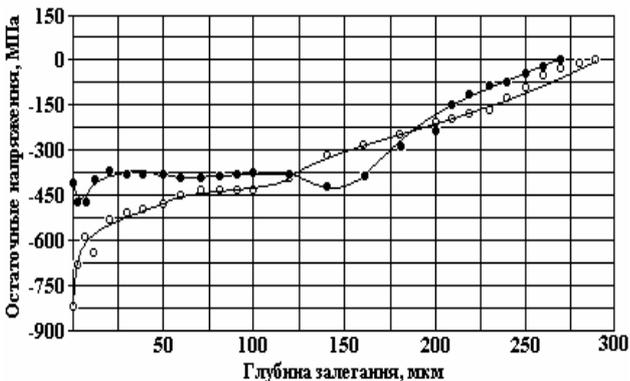
а)



б)



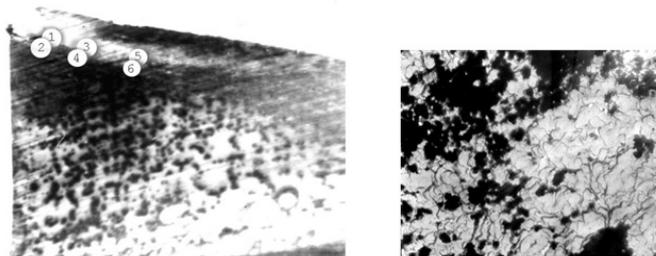
в)



г)

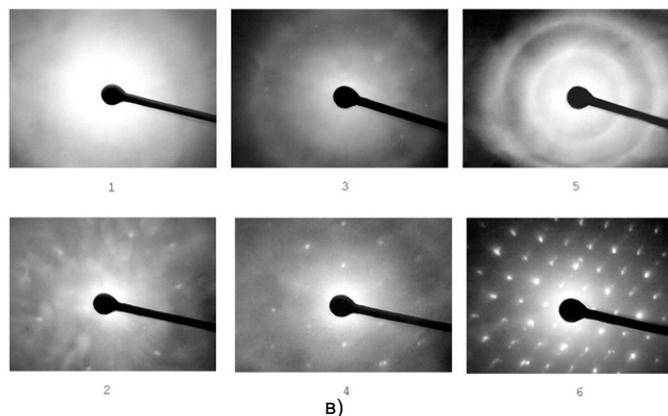
Рис. 8. Эпюры остаточных напряжений в образцах сплава ВТ9 после точения резцами ВК-60М с использованием в качестве СОТС: а – сжатого воздуха; б – ММК СОТС; в – ионизированной воздушной среды; в – упрочняющей дробеструйной обработки шариками $D = 3$ мм

Механизм действия ММК при резании достаточно сложен и, по нашему мнению, имеет в своем основании совместное действие всех компонентов, входящих в состав ММК (рис. 9), активированное протеканием радикально-цепных реакций в зоне контакта.



а)

б)



1

3

5

2

4

6

Рис. 9. Результаты исследований вторичных структур методом тонких фольг, сформированных на передней поверхности резца при точении Ст.3 при использовании ММК-50 $V = 0,48$ м/с, $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,5$ мм: а – области исследования на передней поверхности резца, $\times 10$; б – то же, $\times 8600$; в – электронограммы вторичных структур

Это подтверждается данными экспериментов по трению и резанию, при проведении которых в качестве смазочных материалов использовались отдельные компоненты МК; результатами исследований по замене магнетита на немагнитные вещества; электронной микроскопией и термографическими исследованиями, которые показали на протекание в зоне контакта сложных параллельно идущих химических реакций.

Заключение

Рассмотренный выше вопрос о возможности подачи СОТС при резании металлов в виде магнитных микрокапсул и их влиянии на процессы контактного взаимодействия относится к одному из направлений, сложившихся в мировой практике и способствующих снижению техногенных рисков и улучшению экологии металлообработки. Конструирование новых составов экологически чистых или экологически безвредных СОТС, техника их применения представляют собой многогранную задачу, решение которой

должно базироваться на всестороннем и глубоком изучении физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне между инструментальным и обрабатываемым материалами.

В соответствии с этим, проведение исследований в целях выявления физико-химических закономерностей в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом и разработки на этой основе новых СОТС и способов их применения, обеспечивающих выполнение требуемых как экологических, так и технологических характеристик, является актуальной научно-технической проблемой.

Список литературы

1. **Sertificate** N 297596 (Japan). 1990.
2. **Девочкин А.А.** Разработка составов и техники применения смазочно-охлаждающих композиций при обработке резанием молибдена и алюминия: дис. ... канд. техн. наук. – Горький, 1988. – 203 с.
3. **Whitnev R.A., Colvin V.S., Mulligan J.C.** Two component cutting/cooling fluids for high speed machining/ МКИ F 01 M 5/00.
4. **Кухлинг Х.** Справочник по физике: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
5. **Якунин Г.И., Умаров Э.А., Анцупов А.А.** О воспроизводимости эффектов влияния термотоков и намагниченности резцов на стойкость инструмента при соответственных температурно-скоростных условиях резания / Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. – М.: Наука, 1973. – С. 132–137.
6. **Опитц Г.** Об износе режущего инструмента / Новые работы по трению и смазке. – М., 1959.
7. **Постников С.Н.** Исследование электрических явлений при трении и резании металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ИМАШ, 1968.
8. **Микрокапсулирование** как метод введения трибоактивных присадок в смазочные материалы при резании / А.А. Девочкин, В.Н. Латышев, В.А. Годлевский, К.Н. Железнов: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара «Опыт применения новых смазочно-охлаждающих сред при обработке металлов резанием». – Горький, 1987. – С. 156–159.
9. **Влияние** условий экологически безопасного резания с охлаждением ионизированной газовой средой на качество поверхностного слоя и долговечность деталей: сб. тр. науч.-техн. симпозиума «Двигатели и экология» / В.А. Поклад, В.А. Горелов, Ю.В. Полоскин и др. – М., 2002.

Наумов Александр Геннадьевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный университет»,
доктор технических наук профессор кафедры экспериментальной и технической физики,
адрес: 153025, г. Иваново, ул. Ермака, 39,
телефон (4932) 42-30-51,
e-mail: agn8@yandex.ru

Латышев Владимир Николаевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный университет»,
доктор технических наук профессор, советник ректора,
адрес: 153025, г. Иваново, ул. Ермака, 39,
телефон (4932) 42-30-51.