

УДК 621.923

Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ, А. И. ЛЕЦКО, Е. В. СЕНЧУРОВ, В. В. ШАБУНЯ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Институт порошковой металлургии НАН Беларуси*

(Поступила в редакцию 27.05.2011)

Одним из эффективных и экономически доступных способов повышения производительности процессов резания при обработке поверхностей деталей машин является применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Современные СОТС представляют собой многокомпонентные композиции, в состав которых входят соответствующие присадки, обладающие целенаправленным действием [1, 2].

При магнитно-абразивной обработке (МАО) функцию режущего инструмента выполняет ферроабразивная щетка, которая представляет собой множество взаимосвязанных цепочек из частиц ферроабразивного порошка (ФАП). Данная щетка, прижимаясь к обрабатываемой поверхности и удерживаясь в рабочем пространстве силами электромагнитного поля (ЭМП), осуществляет сьем материала. Чтобы снизить или полностью предотвратить «засаливание» режущего инструмента и обрабатываемой поверхности детали стружкой и другими отходами обработки (шлам), а также уменьшить силы трения при резании и отвести тепло, применяют СОТС.

Использование СОТС при МАО позволяет достичь заданные характеристики макро- и микрогеометрии поверхностного слоя деталей, и следовательно, повышает качество и производительность обработанных изделий. Высокой смазывающей, охлаждающей и диспергирующей способностью обладают СОТС, содержащие в своем составе полимерные соединения типа солей и эфиров сульфонатов. При их механическом разрушении макромолекулы полимерсодержащих компонентов образуют свободные макрорадикалы, которые имеют высокую реакционную способность к металлам. Повышение пластичности металлов характеризуются взаимодействием ювенильных поверхностей с продуктами механической деструкции полимерных цепей. Согласно [3], максимальное значение вышеуказанной способности СОТС достигается при определенном процентном содержании полимеров в их составе. Увеличение их содержания приводит к росту вязкости и возможности гелеобразования, что ухудшает высокоэффективную обработку методом МАО из-за снижения коллекторских свойств щетки. Уменьшение содержания полимеров связывается с изменением степени давления и фильтрации и не обеспечивает производительность и качество обработки. Воздействие тепловой деструкции полимерной цепочки приводит к интенсивному разрушению макромолекул полимера и образованию свободных макрорадикалов, которые взаимодействуют, как указывалось ранее, с поверхностью металла. Это уменьшает его поверхностную энергию и создает необходимые условия для перемещения и зарождения дислокаций. Быстрое насыщение структуры металла дислокациями приводит к нестабильности поверхностного слоя и увеличивает скорость диспергирования материала.

Установлено, что на интенсивность процесса резания при МАО оказывают влияние силы трения, возникающие между поверхностью стружки и абразивным зерном [4]. Специфика трения при МАО состоит в том, что частица ФАП при резании, структурированная энергией ЭМП, является подвижно скоординированной. Это обуславливает изменение ее переднего угла при

контакте с обрабатываемой поверхностью, которое приводит к изменению коэффициента трения, зависящего от следующих факторов: обрабатываемого и обрабатывающего материалов, режимов обработки, применяемых СОТС.

Рассмотрим механизм процесса, происходящего в результате контакта единичного абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью детали, в котором наиболее важны упругая деформация, пластическая деформация, деформация сдвига. Данные виды деформаций происходят как последовательно, так и одновременно, но каждая последующая деформация не произойдет, минуя предыдущую [5]. Это зависит от отношения a/ρ (где a – толщина среза, приходящегося на единичное зерно, ρ – радиус закругления вершины зерна), характеризующего процесс стружкообразования. Схема взаимодействия единичного зерна, имеющего радиус закругления вершины ρ , представлена на рис. 1.

При МАО величина переднего угла γ имеет переменное значение и зависит от координаты a' рассматриваемой точки на передней поверхности зерна [6]:

$$\frac{a'}{\rho} = (1 + \sin \gamma'). \quad (1)$$

При некотором значении $a' > a$ происходит отделение стружки. Определим критическую величину переднего угла γ , соответствующую этому состоянию. Согласно рис. 1, для образования стружки необходимо, чтобы сила сдвига P_τ была положительной и выполнялось условие

$$\beta_1 + \omega < \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Поскольку $\omega = \xi - \gamma$ и $\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\eta - \sin \gamma}$ [5] (η – коэффициент усадки стружки), то неравенство (2) примет вид

$$\frac{\cos \gamma}{\eta - \sin \gamma} < \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{2} - (\xi - \gamma) \right]. \quad (3)$$

Производя ряд преобразований, получаем при учете $\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \operatorname{ctg} \alpha$

$$\operatorname{tg}(\xi - \gamma) < \frac{\eta - \sin \gamma}{\cos \gamma}. \quad (4)$$

Поскольку $(\xi - \gamma) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$, то неравенство (4) можно представить таким образом:

$$\frac{\operatorname{tg} \xi - \operatorname{tg} \gamma}{1 + \operatorname{tg} \xi \operatorname{tg} \gamma} < \frac{\eta - \sin \gamma}{\cos \gamma}. \quad (5)$$

Подставив значение $\operatorname{tg} \xi = \mu$, где μ – коэффициент трения при резании, получим

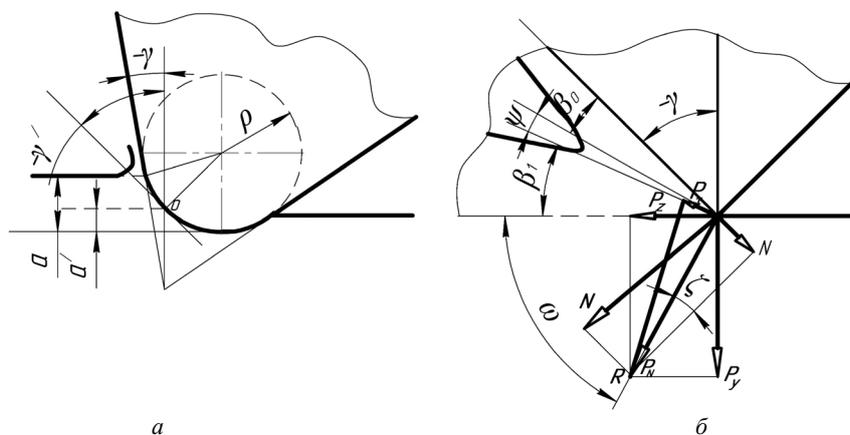


Рис. 1. Схемы снятия стружки абразивным зерном: *а* – схема контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью; *б* – схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

$$\frac{1}{\mu} \cos \gamma + \sin \gamma - \frac{1}{\eta} > 0. \quad (6)$$

Выразив $\cos \gamma$ через $\sin \gamma$, получим квадратичное уравнение следующего вида:

$$\eta^2(1 + \mu^2) \sin^2 \gamma - 2\mu^2 \eta \sin \gamma + (\mu^2 - \eta^2) > 0, \quad (7)$$

корень которого лежит в диапазоне $-1 \leq \sin \gamma \leq 1$, находим $\sin \gamma$ по формуле:

$$\sin \gamma > \frac{1}{1 + \mu^2} \left(\frac{\mu^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu^2 - \frac{\mu^2}{\eta^2}} \right). \quad (8)$$

С учетом (1) выражение, характеризующее начало стружкообразование, примет вид

$$\frac{a}{\rho} > 1 + \frac{1}{1 + \mu^2} \left(\frac{\mu^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu^2 - \frac{\mu^2}{\eta^2}} \right). \quad (9)$$

Зависимость деформации сдвига $\frac{a}{\rho}$, как представлено выражением (9), в значительной степени связана с коэффициентом трения μ . Поскольку относительный сдвиг происходит в масляном слое, то коэффициент μ во многом связан с вязкостью среды [7]. Наличие свободных ненасыщенных связей в кристаллической решетке ювенильных поверхностей приводит к схватыванию, что в зависимости от масштаба процесса может привести к снижению шероховатости слоя обрабатываемого материала. Поскольку в современном производстве используют средства механического воздействия на обрабатываемый материал заготовки для ее формообразования и немеханического воздействия (электрофизическое, магнитное, электронное и т. д.), то данное наложение концентрированных потоков энергии приводит к ряду изменений физико-химических показателей среды, в частности вязкости.

При подборе СОТС для МАО необходимо учитывать ее влияние на коэффициент трения. Показатели среды, в которой происходит процесс резания, существенно влияют на его критические параметры. Поэтому повышенный интерес вызывают наличие и поведение комплексообразователей, регулирующих радикализацию свойств и структуру лиганды СОТС. Она представляет собой комплексное соединение молекул, непосредственно связанных с центральным атомом. Решение вопроса регулирования процессом резания при МАО связано с правильным сочетанием и концентрацией комплексообразователей СОТС и присутствием различных заместителей как из одного, так и из нескольких гомологических рядов. Высокая молекулярная масса в пределах одного состава химического соединения обеспечивает либо инициирование, либо замедление гель-эффекта, что важно для реализации процесса МАО. Содержание подобных фрагментов приводит к ингибированию данного процесса как на начальной, так и на глубокой стадиях. Ведение координационных соединений натриевого и магниевого комплекса, обеспеченных молекулярным рядом лигносульфонатов, показывает, что они выполняют роль веществно-иницированных продуктов для управления процессом диспергирования при МАО. Сдвиг в сторону больших времен стадии гель-эффекта обычно осуществляется при высоких мольной доле и расходе молекулярной цепи с образованием радикалов различной активности или захватом радикала, ведущего цепь. Уменьшение энергии разрыва связей в лигносульфонатном комплексе зависит от лигандного окружения или от степени окисления металлической поверхности, подвергаемой обработке. Лигандное окружение в комплексе приводит к перераспределению связей, что сказывается на замедлении отрыва радикалов или на полном их отрыве. Общая скорость отрыва радикалов при различном содержании компонентов в комплексе, в первую очередь, связана с их активностью, зависящей от величины радикала и обусловленной механизмом реакционной способности и устойчивости. Кинетика гелеобразования определяется всеми входящими в комплекс группами для придания этому комплексу целевого назначения. Смещение гель-эффекта в сторону высоких или низких конверсий характеризуется природой сохранившихся лиганд и их макрорадикальным уровнем при условии варьирования гомолитического разрыва связей комплекса, эффективность которого представляет целевые свойства СОТС как агента ра-

бочей технологической среды (РТС). РТС включает в себя СОТС, ФАП и структурирование этих агентов ЭМП.

Усложненная структура макромолекулы и наличие различных функциональных групп позволяют использовать в реакциях синтеза и комплексообразования такое химическое соединение как лигносульфонаты.

Лигносульфонаты технические жидкие марки А, ТУ 2455-028-00279580–2004 представляют собой однородную густую жидкость темно-коричневого цвета. Лигносульфонаты являются побочным продуктом переработки древесины и представляют смесь натриевых и магниевых солей лигносульфоновых кислот (с примесью редуцирующих и минеральных веществ), получаемых из щелоков бисульфитной варки целлюлозы. Будучи водорастворимыми в любых соотношениях, лигносульфонаты технические обладают универсальными свойствами ПАВ. Молекулярная масса от 200 до 200000 и выше. Лигносульфонаты – анионные ПАВ, которые незначительно понижают поверхностное натяжение воды и образуют стойкие эмульсии и пены. Установлено, что вязкость растворов лигносульфонатов зависит от природы катиона и температуры [8]. Лигносульфонаты применяются, например, при регулировании вязкости буровых растворов и в качестве компонентов гелеобразующих систем для фильтрации и ограничения водопритока в процессах, повышающих нефтеотдачу.

Процесс резания материалов требует детального исследования при использовании лигносульфонатов как одного из компонентов СОТС. Необходимо иметь в виду при создании СОТС, что рост поверхностно-активных свойств неионогенных и ионогенных ПАВ тем выше, чем больше разность в значении критической концентрации мицеллообразования исходных компонентов. Особенностью лигносульфонатов является необратимость образования полимеризатов при условии высокой температуры и уменьшении показателя рН. Недопустимость столь глубокой полимеризации связана с тем, что полученные таким путем продукты с очень высокой молекулярной массой выпадут из раствора СОТС, создавая трудноудаляемые органические отложения. Это приводит к изменению качественного состава при возрастании доли менее полимерных фракций в СОТС и снижению вязкости. Также полимеризация сопровождается отщеплением функциональных групп или структурных элементов, приводящим к новообразованию летучих органических веществ, главным представителем которых является уксусная кислота. Поскольку процесс МАО реализуется в определенном динамическом режиме, то рост давления интенсифицирует окислительно-деструкционные реакции и кислотность конденсатов резко возрастет. Для исключения этого требуется создание достаточно диапазона показателя рН, равного 7,5–8,5. Это обеспечивается использованием при подготовке концентрата СОТС операций этерификации и модифицирования за счет присутствия триэтаноламиновых эфиров синтетических жирных кислот (СЖК) фракции C_7-C_9 , что является следствием образования более сложных ассоциатов, обладающих сильно возросшим электрокинетическим потенциалом.

Поскольку лигносульфонаты по причине возможностей изменения молекулярно-массового распределения фракций обладают высокой функциональной зависимостью вязкости, то роль стабилизатора композиции выполняют триэтаноламиновые эфиры СЖК фракции C_7-C_9 .

Макромолекулы при термовоздействии в ходе протекания МАО переходят из гибкой структуры в жесткую. Они способны к желатинизации системы и образуют различные по стабильности комплексы. С целью установления эффективности МАО при использовании разных составов СОТС проведены экспериментальные исследования (табл. 1, 2). Образцами являются заготовки размерами $D \times d \times l = 32 \times 28 \times 30$ мм, материалы образцов – сталь ШХ15 ГОСТ 801–78, сталь 20

Т а б л и ц а 1. Химический состав СОТС на основе лигносульфонатов, исследованных при МАО

Компонент	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Триэтаноламиновые эфиры СЖК фракции C_7-C_9	65	70	75
Лигносульфонат	7,5	10	12,5
Нитрит натрия	2	2	2
КОН	2	2	2

П р и м е ч а н и е. Вода во всех составах до 100 мас.%.

Т а б л и ц а 2. Физико-механические свойства различных составов СОТС

Показатель	Состав СОТС			
	1	2	3	СинМА-1
Вязкость кинематическая при 50 °С, мм ² /с	38,7	41,0	42,7	40,5
рН 3%-ного раствора	8,2–8,6	8,0–8,5	8,5–8,7	8,5–8,7
Склонность к пенообразованию, см ³	до 450	до 500	до 450	до 500
Устойчивость пенообразования, см ²	до 120	до 150	до 130	до 150
Плотность, кг/м ³	1,0	1,1	1,05	1,1

Т а б л и ц а 3. Зависимость производительности процесса МАО при различных видах СОТС

Вид СОТС	Величина удельного массового съема обрабатываемых материалов, мг/(см ² ·мин)		
	ШХ15	Д16	Сталь 20
СинМА-1	10,31	6,25	12,35
Состав 1	6,12	4,78	8,07
Состав 2	10,55	7,39	11,74
Состав 3	7,44	5,31	7,98

П р и м е ч а н и е. Расход СОТС 60 мл/мин.

ГОСТ 1050–88, алюминиевый сплав Д16 ГОСТ 4784–97. Оборудование – станок магнитно-абразивный модели ЭУ-1. Режимы и параметры процесса МАО приняты следующими: величина магнитной индукции $B = 0,9$ Т; скорость резания $V_p = 2,1–2,4$ м/с; скорость осцилляции $V_o = 0,2$ м/с; амплитуда осцилляции $A = 1–3$ мм; коэффициент заполнения рабочего зазора $k_z = 1$; величина рабочего зазора $\delta = 1$ мм; время обработки $t = 180$ с. Исходная шероховатость образцов, $Ra_1 = 1,6–2,0$ мкм. В качестве ФАП применялся ФТ-2 (рис. 2).

Измерение шероховатости поверхности осуществлялось на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр», взвешивание образцов – на весах лабораторных ВЛТ-1 с точностью до 0,001 г, производительность процесса – по величине удельного массового съема, мг/(см²·мин). В качестве базового представлен состав СинМА-1 ТУ 38.5901176–91, 3%-ный водный раствор. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Образование комплекса (Fe^+ – лигносульфонат – триэтаноламиновые эфиры СЖК фракции $C_7–C_9$) приводит к уменьшению величины рН раствора, наступлению коагуляции полимерных фракций лигносульфоната с растянутой во времени скрытой стадией [5]. Это является следствием связывания Fe^+ с лигносульфонатом в комплексное соединение и проявления астабилизирующего действия, приводящего к нарушению устойчивости лиофильных коллоидов. Чтобы снизить отрицательный эффект этого действия, необходимыми условиями являются повышение расхода партии СОТС в среднем на 50% и использование фракций лигносульфонатов с низкой молекулярной массой.

Стабильное сложное образование в виде гексааква алюминиевых гидратов также вызывает понижение рН при росте сорбирующего алюминиевого шлама и сохранении водорастворимости

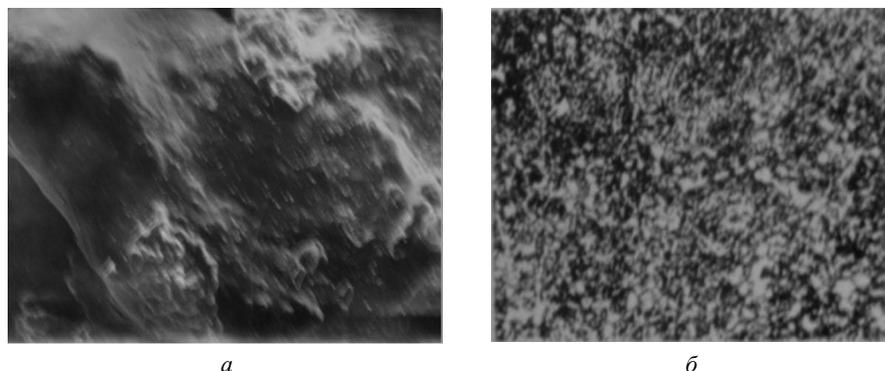


Рис. 2. Морфология (а) и микроструктура (б) порошка ФТ-2.

[8]. Однако повышение температуры в зоне обработки и динамический фактор приводят к созданию единого агрегата через отдельные фрагменты лигносульфонатов и триэтаноламиновых эфиров. Следует отметить, что данные агрегатированные соединения имеют «рыхлую» структуру и с большой легкостью по причине высокой реакционной способности диффундируют на поверхность частиц ФАП, придавая им сизый оттенок, наблюдаемый визуально.

Введение в зону обработки слабощелочного (1,5–2%) раствора NaOH показывает, что композиция лигносульфоната алюминия, имеющая склонность к гелеобразованию, со сплошной структурой стабилизируется путем повышения показателя pH и протекания протолитических реакций. В результате при росте pH образуется нейтральное соединение $Al(H_2O)_3(OH)_3$, у которого в отличие от гексааква алюминиевых гидратов процесс конденсации значительно замедлен и поэтому режущая стойкость частиц ФАП повышается. Также отмечается, что введение слабощелочного раствора приводит к возрастанию объема пенного столба.

Во-первых, сохранение в зоне обработки требуемого узкого диапазона pH носит стохастический характер; во-вторых, наличие раствора NaOH вызывает появление интенсивных пятен и очагов коррозии на оборудовании, что требует повышенного содержания в СОТС ингибиторов

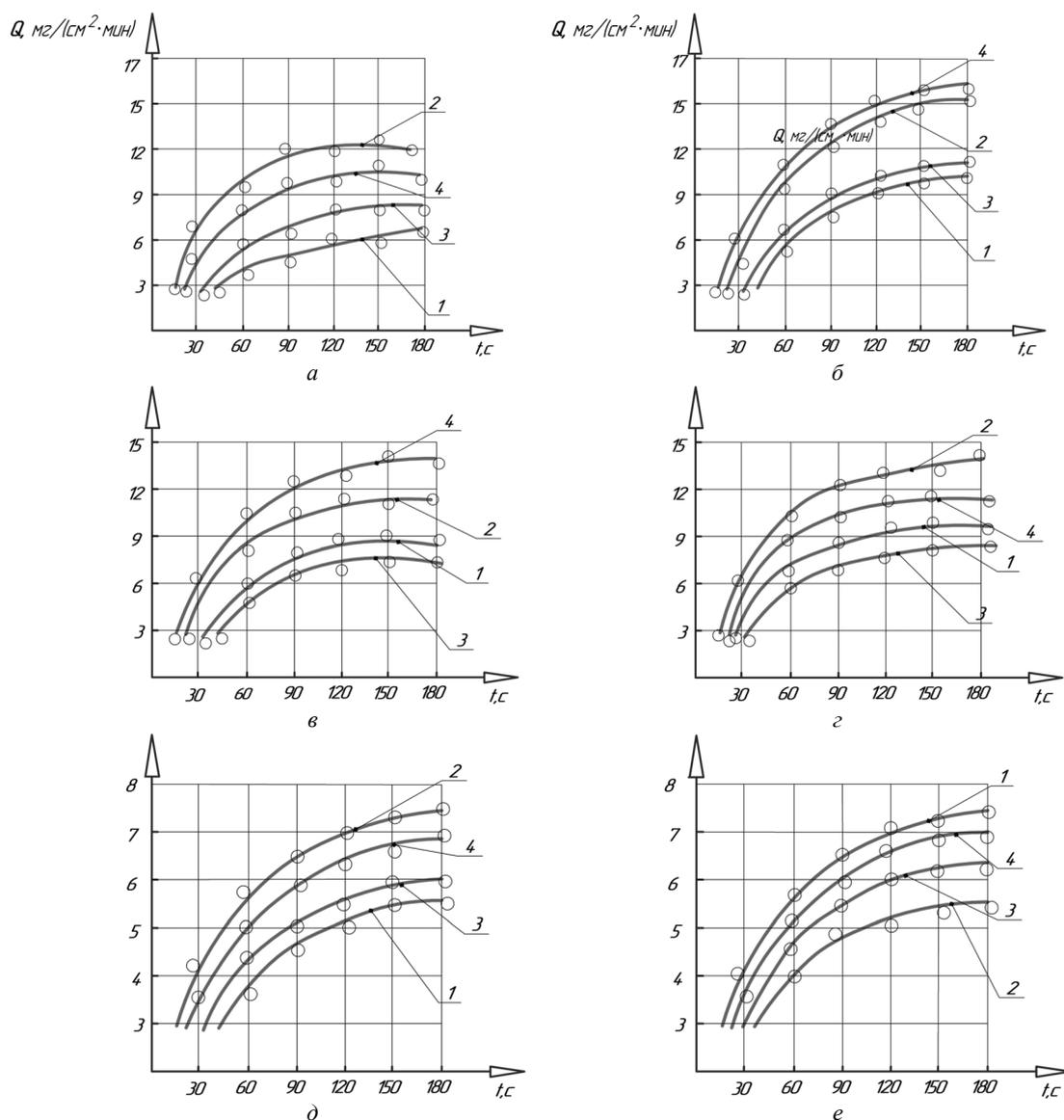


Рис. 3. Зависимость производительности процесса МАО от времени обработки при различных показателях расхода СОТС (1 – состав 1, 2 – состав 2, 3 – состав 3, 4 – СинМА-1) для стали ШХ15 (а, б); для стали 20 (в, г); для алюминиевого сплава Д16 (д, е); а, в, д – расход СОТС 60 мл/мин, б, г, е – 100 мл/мин

коррозии типа нитрита натрия ГОСТ 199906–74, для производства которого необходим только высший сорт нитрата натрия ГОСТ 828–77, а сам нитрит натрия – токсичный продукт с экологической точки зрения.

При взаимодействии лигносульфонатов с соединениями Ст при $t = 20$ °С и выше образуются хелатные комплексы. Однако при использовании соединений Ст вязкость раствора не возрастает, что указывает на отсутствие процесса гелеобразования. Поскольку в технических лигносульфонатах всегда присутствуют моносахариды, то они активно вступают в реакцию с бихроматами, образуя щавелевую кислоту, диоксид углерода и воду. Если массовая доля сухих веществ ниже 40%, молекулярная масса фракции менее 10000 и водный раствор концентрата СОТС не превышает 5%, то эффективность использования подобных составов, а также их стабильность находятся на высоком уровне.

На рис. 3 представлены результаты исследований процесса МАО в зависимости от продолжительности обработки при расходе СОТС 60 и 100 мл/мин. Их анализ показывает, что увеличение расхода СОТС в среднем в 1,5 раза не оказывает существенного приращения производительности удельного съема материала для стали ШХ15, а для алюминиевого сплава Д16 и стали 20 это увеличение обеспечивает прирост вышеуказанного съема материала в среднем на 20 и 30% соответственно.

В результате проведенных исследований предложен новый состав СОТС для финишной обработки деталей машин из сталей 20 и ШХ15 и алюминиевого сплава Д16 на основе триэтаноламиновых эфиров СЖК фракции C_7-C_9 и лигносульфонатов технических, который характеризуется доступностью исходных материалов, простотой технологического процесса изготовления и эффективностью использования. Товарная стоимость концентрата нового вида СОТС в 2–3 раза ниже по отношению к стоимости СинМА-1. Шероховатость образцов по параметру Ra после МАО в среднем для состава СОТС 2 и СинМА-1 – ШХ15 : 0,05–0,1 и 0,07–0,09 мкм; сталь 20: 0,2–0,3 и 0,1–0,2 мкм; алюминиевый сплав Д16: 0,08–0,12 и 0,05–0,1 мкм.

Литература

1. Хомич Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий. Мн., 2006.
2. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и металлорежущего инструмента. Л., 1986.
3. Гроховский Г. Я. Полимеры в технологии обработки металлов. Киев, 1975.
4. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. Мн., 1981.
5. Ящерицын П. И., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Мн., 2005.
6. Никифоров И. П. // Инструмент и технологии. 2003. № 2. С. 8 – 13.
7. Трение, износ и смазка (трибология и триботехники) / Под. ред. А. В. Чичинадзе М., 2003.
8. Никитин В. М. Химия древесины и целлюлозы. М., 1978.

L. M. AKULOVICH, L. E. SERGEEV, A. I. LETSKO, E. V. SENCHUROV, V. V. SHABUNIA

USE OF CUTTING TECHNOLOGY TOOLS BASED ON LIGNOSULFONATES AT MAGNETIC ABRASIVE MACHINING

Summary

A new type of lubricating-cooling technological means for finishing of machine parts from steel: 20 and ШХ15, and aluminum alloy Д16 on the basis of triethanolamine esters of fatty acids fractions $C_7 - C_9$ and technical lignosulfonate, which is characterized by the availability of raw materials, ease the process of manufacture and use efficiency.