

УДК 621.923

Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ, Е. В. СЕНЧУРОВ, В. В. ПАДАЛЯК

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступила в редакцию 17.03.2011)

Введение. В машиностроении возрастает роль использования смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) при обработке металлов резанием. Применение СОТС позволяет повысить качество и производительность обработки поверхностей деталей машин.

Особенно велико значение СОТС при финишных операциях, к которым относится метод магнитно-абразивной обработки (МАО). Наличие эластичной режущей щетки позволяет сочетать преимущества обработки как свободным, так и связанным абразивом, что существенно решает технологические возможности метода при полировании плоских изделий, тел вращения и деталей сложного профиля.

Так как в настоящее время появилось большое количество СОТС различных наименований и назначений, важно рационально подобрать СОТС, отвечающие конкретным условиям производства.

Постановка задачи. При МАО роль рабочей технологической среды помимо ферроабразивного порошка (ФАП) и электромагнитного поля (ЭМП) играют СОТС, содержащие в том числе поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Современные представления о механизме действия СОТС при МАО, способствующих интенсификации процесса резания металлов, базируются на работах П. А. Ребиндера [1], объясняющего эффект адсорбционного понижения прочности металлов в присутствии ПАВ. Данными исследованиями установлено, что влияние ПАВ обусловлено их адсорбционным воздействием непосредственно на ювенильную поверхность обрабатываемого металла. Прежде всего, действие адсорбции состоит в том, что ПАВ способствуют расклинивающему эффекту, который приводит к зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов при значительно меньших напряжениях. Этому воздействию подвергаются дефекты структуры реального твердого тела, непрерывно развивающиеся в процессе упругой и пластической деформации с образованием новых дефектов. Поверхностные дефекты представляют собой микроскопические и субмикроскопические трещины и щели клиновидного сечения. Наличие микротрещин в поверхностном слое приводит к снижению прочностных характеристик изделия, существенно отличающихся от теоретических значений.

Установлено [1], что адсорбция молекул ПАВ на поверхности изделия осуществляется в виде мономолекулярного слоя. Движущей силой втягивания адсорбционных слоев в микротрещины является вызываемое их проникновением понижение поверхностной энергии или двумерное давление, представляющее собой разность между удельной свободной энергией поверхности в вакууме и удельной свободной энергией поверхности, покрытой адсорбционным слоем. Процессу непрерывного диспергирования обработанной поверхности способствуют не только проникновение адсорбирующих веществ в глубь металла, но и торможение самопроизвольного смыкания трещин, т. е. расклинивающий эффект. Последний значительно зависит от вида меха-

нической обработки и наиболее полно проявляется при минимальной толщине срезаемого слоя, в частности при MAO, обеспечивающей тонкое диспергирование металла. Поскольку ФАП находится в рабочем зазоре в подвижно скоординированном состоянии, то в процессе обработки обеспечивается свободный доступ СОТС к режущему инструменту и поверхности детали.

Одним из важных проявлений свойств СОТС является их моющее действие, оценка которого производилась по отдельным физико-химическим характеристикам: поверхностной активности, пептизирующей способности, смачиваемости. Моющее действие СОТС заключается в интенсивности вымывания из зоны обработки продуктов диспергирования металла и изношенных частиц абразивного инструмента. Критерием моющей способности СОТС, согласно [2], может быть показатель степени связи между поверхностной активностью и поверхностной прочностью в виде средней коллоидности вещества $M_k\beta_k$:

$$M_1\beta_1 < M_k\beta_k < M_2\beta_2, \quad (1)$$

где M_k – коллоидность вещества, мм; β_k – содержание коллоидно-дисперсной части.

Проявлением СОТС также является охлаждающее действие, которое заключается в отводе тепла от обрабатываемой детали и режущего инструмента. Известно, что любая технологическая система может функционировать только при подводе к ней энергии, которая полностью или частично преобразуется в тепло. Процесс теплообмена и направление тепловых потоков обусловлены перераспределением температуры [3]. При подаче СОТС в рабочую зону температура обрабатываемой поверхности в зоне MAO достигает 50–70 °С. Установлено [4], что жидкости, содержащие растворы ПАВ с молекулами большой длины, образуют над монослоем полярных молекул граничный слой, где молекулы правильно ориентированы относительно друг друга. Граничные слои находятся в особом агрегатном состоянии, имея квазикристаллическую структуру. При определенной температуре силы продольной когезии между молекулами исчезают, происходит дезориентация адсорбированных молекул и теряется способность растворов СОТС к адсорбции. Температура дезориентации на химически неактивных металлах для жирных кислот близка к температуре плавления (70–80 °С), квазикристаллическая структура граничных фаз распадается.

Удельный тепловой поток q от твердого тела с температурой t_τ к жидкости с температурой $t_{ж}$, согласно формуле Ньютона, определяется таким образом:

$$q = \alpha(t_\tau - t_{ж}), \quad (2)$$

где α – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Чем больше значение коэффициента теплоотдачи, тем лучше СОТС отводит тепло от режущего инструмента, стружки и детали. Отвод тепла при резании происходит вследствие конвекции, теплопроводности и химических реакций, происходящих с его поглощением, что сопровождается процессами тепло- и массообмена. Согласно [4], конвективный теплообмен между жидкостью и поверхностью твердого тела устанавливается по числу Нуссельта, которое представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи:

$$Nu = cRe^n Pr^m (Pr/Pr_{п.с.})^{0,25}, \quad (3)$$

где c – удельная массовая теплоемкость, кДж/(кг·К), Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля, $Pr_{п.с.}$ – число Прандтля в пограничном слое, m , n – показатели степени, характеризующие различные технологические среды.

Известно, что степень влияния СОТС на коэффициент теплоотдачи μ определяется их тепло- и температуропроводностью, скоростью движения в зоне обработки, площадью охлаждаемой поверхности и вязкостью:

$$\mu = \nu\rho \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость, сСт, ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Установлено, что число Нуссельта уменьшается при увеличении значения μ [4]. Это приводит к росту рабочей температуры в пограничном слое между жидкостью и поверхностью твердого тела.

Эффективность теплоотвода обусловлена подачей СОТС в зону резания. Проникновение СОТС в данную зону при MAO определяется пористостью ферроабразивной среды в рабочем зазоре, проницаемость можно рассчитать по формуле Козени–Кармана для зернистых сред:

$$k = C \frac{m^2 d^2}{(1-m)^2}. \quad (5)$$

Здесь C – постоянная ($C \approx 0,5 \cdot 10^{-2}$), m – пористость среды, d – внутренний масштаб (размер зерна ферроабразивного порошка), мкм.

Наличие поровых каналов, сечения которых резко и хаотично изменяются в пространстве вследствие неправильной формы и разнообразных размеров частиц, находящихся в рабочем зазоре, делает практически невозможным точное решение уравнения движения вязкой жидкости в таких условиях. В связи с этим при гидродинамическом изучении фильтрации пользуются упрощенными моделями пористой среды [5]. В нашем случае упрощенной моделью будут ФАП (поровые каналы представляют собой пучок цилиндрических трубок с параллельными осями) и ФАП, имеющий частицы преимущественно шарообразной формы. Пределы изменения проницаемости последнего: $0,0931 \leq m \leq 0,2146$.

Движение вязкой жидкости определяется уравнением Навье–Стокса

$$\rho \left(\frac{\partial w_m}{\partial t} + w_l \frac{\partial w_m}{\partial x_l} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_m} + \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\eta \left(\frac{\partial w_m}{\partial x_l} + \frac{\partial w_l}{\partial x_m} - \frac{2}{3} \delta_{ml} \frac{\partial w_n}{\partial x_n} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\xi \frac{\partial w_n}{\partial x_n} \right). \quad (6)$$

Не учитывать влияние вязкости на скорость течения жидкости правомерно лишь на значительном расстоянии от ограничивающих поток твердых стенок ФАП. Поскольку на поверхности твердой стенки скорость жидкости равна нулю, то вблизи твердой стенки будет наблюдаться резкое изменение скорости жидкости. Областью таких изменений скорости является зона вблизи твердой стенки, в которой недопустимо пренебрегать вязкостью даже при больших значениях Re . Таким образом, поток жидкости можно условно разделить на основную часть (ядро потока), где можно не учитывать влияние вязкости и рассматривать ее как поток идеальной жидкости, и слой вблизи твердой стенки, где необходимо учитывать действие вязкости.

Рассмотрим течение СОТС в каналах ФАП как течение вязкой жидкости по трубе постоянного сечения. Значения скорости, соответствующие данным условиям, устанавливаются только на некотором расстоянии от входного сечения трубы. По мере удаления от входного сечения трубы слои жидкости, расположенные ближе к стенкам канала, будут тормозиться сильнее по сравнению со слоями ядра потока. В результате скорость по поперечному сечению канала будет изменяться, переходя из плоского в выпуклый, пока не достигнет степени выпуклости, вполне отвечающей условиям рассматриваемого течения. В дальнейшем значения скорости остаются неизменными, и в любом сечении по длине канала она изменится от нуля у стенки до одного и того же наибольшего значения w_0 на оси канала.

Скорость жидкости при движении в канале равна

$$w_x = - \frac{R}{2\eta} \frac{dp}{dx} z, \quad (7)$$

где R – радиус канала, м; η – динамическая вязкость жидкости, Н·с/м²; p – давление, Н/м².

Скорость на оси канала следующая:

$$w_0 = - \frac{R^2}{4\eta} \frac{dp}{dx}. \quad (8)$$

Средняя скорость течения жидкости по каналу определяется таким образом:

$$\bar{w} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R w_x 2\pi r dr = - \frac{R^2}{8\eta} \frac{dp}{dx} = \frac{w_0}{2}. \quad (9)$$

Вычислим коэффициент объемной вязкости ξ . По определению $\xi = -\frac{2D}{\rho \bar{w}^2} \frac{d\rho}{dx}$, $\frac{d\rho}{dx} = -\frac{32\eta}{D^2} \bar{w}$, следовательно,

$$\xi = \frac{64\eta}{\rho \bar{w} D} = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

Здесь D – диаметр канала, м, ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Однако в зоне вблизи твердой стенки при наличии магнитного поля падение скорости при приближении к стенке связано с действием сил трения в ЭМП, т. е. обусловлено как обычной вязкостью, так и «магнитной» вязкостью жидкости, пренебрегать которыми в данном случае не представляется возможным даже при больших значениях Re [6].

Таким образом, главным фактором при создании нового вида СОТС на основе ПАВ является подбор компонентов и их физико-химических свойств, влияющих на производительность и шероховатость обработки деталей машин посредством механизма поверхностных явлений на границе раздела фаз.

Результаты исследований. Известные СОТС для МАО характеризуются такими недостатками, как слабое моющее действие, засаливание поверхности инструмента или абразивного зерна из-за большого содержания минеральных масел. По этой причине они не обеспечивают стабильность режущих и смазочных свойств [7]. В [8] представлены результаты исследований различных ПАВ, применяемых для очистки деталей из черных и цветных металлов, и одним из наиболее эффективных признано неионогенное ПАВ ОП-10 ГОСТ 8433–81. Его состав представляет собой полиэтиленовый эфир диалкилфенола (алкильный остаток, содержащий 8–10 атомов углерода) с 10–12 молями оксиэтилена. Коэффициент поверхностного натяжения ПАВ ОП-10 составляет 10–34,47 МДж/м², поверхностная активность – 109, 44 дин×л/(см×г), критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) – 0,3 г/л, по сравнению с другими ПАВ набор данных характеристик обеспечивают лучшие моющие свойства. Эти характеристики важны экономически и позволяют определить оптимальный расход ПАВ, необходимый для создания наиболее эффективного моющего действия. Расширение технологических возможностей процесса МАО достигается созданием нового вида СОТС для черных металлов, включающего в себя триэтаноламин ТУ 2423-168-00203335–2007, олеиновую кислоту ГОСТ 7580–91, нитрит натрия ГОСТ 19906–74, мылонафт ГОСТ 13302–77, тринатрийфосфат ГОСТ 201–76, эмульгатор ОП-10 ГОСТ 8433–81. Соотношение компонентов СОТС указано в табл. 1.

Таблица 1. Химические составы образцов СОТС

Компонент, мас.%	Состав СОТС		
	I	II	III
Триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты	0,4	0,5	0,6
Мылонафт	0,5	0,6	0,7
Эмульгатор ОП-10	0,5	0,6	0,7
Тринатрийфосфат	0,2	0,3	0,4
Нитрит натрия	0,2	0,3	0,4
Вода	Остальное		

Введение мылонафта, являющегося разновидностью асидола, направлено на повышение режущих и смачивающих свойств и устойчивости при хранении СОТС. Он представляет собой техническую смесь натриевых мыл нафтеновых кислот, минерального масла и воды, изготавливается путем щелочной очистки керосиновых, газойлевых и соляровых дистиллятов нефти при содержании 45% нафтенов, 9–15% неомыляемых веществ, 4-5% минеральных солей, выпускается в виде вязкой массы желто-коричневого цвета. Триэтаноламин и олеиновая кислота образуют триэтаноламиновое мыло, которое является высокоэффективным смачивателем и приводит к обезжириванию металлических поверхностей. Нитрит натрия изолирует соли жидкостей и предот-

вращает их реакцию с мылами. Тринатрийфосфат применяется как средство для растворения всех видов минеральных загрязнений, и, кроме того, его использование уменьшает величину поверхностного натяжения раствора.

Моющее действие данного вида СОТС и его эффективность определяются эмульгатором ОП-10 и концентрацией в растворе ПАВ. Эмульгатор ОП-10 относится к полиэтиленовому эфиру диалкилфенола, техническое соединение общей формулы которого $RC_6H_4O(CH_2CH_2O)_nH$, где R – алкил C_7 и выше, $n > 1$. Его растворимость в воде зависит от соотношения молярной массы гидрофобного радикала R и гидрофильных оксиэтильных групп, которые обычно уменьшаются с повышением температуры. Эффективность моющего действия, согласно проведенным испытаниям, достигается при концентрации до 2 г/л. Увеличение концентрации эмульгатора ОП-10 в водном растворе более 2 г/л вызывает засаливание ферроабразивной «щетки», играющей роль инструмента при MAO. Такая ситуация находит свое объяснение в том, что показатель КKM эмульгатора ОП-10 обычно не превышает 0,2 г/л и поэтому наличие достаточного количества мицелл сферической формы хорошо удерживает масляные загрязнения. Увеличение концентраций ОП-10 в растворе СОТС связано с перестройкой мицелл, что приводит к образованию слоистого типа (мицелл Мак-Бена) и смешанного типа. Эти мицеллы в отличие от сферических сольбилизируют смазку и по данной причине только до определенной концентрации ОП-10 в растворе СОТС степень очистки (моющее действие) возрастает, а затем падает.

Предложенное соотношение компонентов позволяет получить обрабатываемый материал с более высокими эксплуатационными качествами и наименьшими затратами по сравнению с прототипом СинМА-1. Приготовление концентрата осуществляли механическим смешиванием компонентов при температуре 50–70 °С. Для MAO металлов используют 3%-ный раствор концентрата в воде.

Для сравнения действия различных составов СОТС были проведены испытания. Химические составы и физико-механические свойства испытуемых СОТС представлены в табл. 1, 2.

Испытания составов СОТС производились на экспериментальной установке для MAO модели ЭУ-1. Параметры MAO приведены в табл. 3.

Таблица 2. Физико-механические свойства предлагаемых составов СОТС

Показатель	Состав СОТС		
	I	II	III
Вязкость кинематическая при 50 °С, мм ² /с	92	98	106
pH 3%-ного раствора	8,7	8,5	9,0
Склонность к пенообразованию, см ³	570	530	528
Устойчивость, см ²	136	150	142
Плотность, кг/м ³	950	982	1070

Таблица 3. Параметры и режимы магнитно-абразивной обработки

Магнитная индукция в рабочем зазоре, Т	0,9
Скорость вращения детали, м/с	2,5
Скорость осцилляции детали, м/с	0,15
Амплитуда осцилляции, мм	3
Рабочий зазор, мм	1,5
Режущий инструмент	Ферроабразивный порошок Ж15КТ, зернистость 200–315 мкм
Время обработки, с	60

В качестве обрабатываемых образцов использовали кольца подшипника $D \times d \times l = 35 \times 30 \times 30$ мм из стали ШХ15 ГОСТ 801–78. Исходные значения шероховатости параметра Ra поверхности образцов находилась в пределах 1,2–1,8 мкм. В процессе испытаний оценивали массовый съем металла и шероховатость поверхности.

Массовый съем металла определяли как разность масс образцов до и после МАО. Массы исходных и обработанных образцов из стали ШХ15 вычисляли взвешиванием на лабораторных весах модели ВЛА-200-2М с точностью до $\pm 0,001$ г. Исследование шероховатости поверхности образцов выполнялось на профилографе-профилометре модели 252 «Калибр». Значения показателей определялись как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах. Данные испытаний приведены в табл. 4. Установили, что при увеличении количества воды (состав I) концентрат СОТС теряет такое свойство, как снижение режущей способности. При уменьшении количества воды (состав III) происходит неполное растворение нитрита натрия, образование гидрофобных пленок на зернах ферроабразивного порошка и обрабатываемой поверхности из-за большего содержания мылонафта в растворе, в результате снижаются режущие и смазочные свойства СОТС.

Таблица 4. Результаты обработки образцов

Состав СОТС	Массовый съем ΔG , мг	Шероховатость поверхности по параметру Ra , мкм
СинМа-1	4,33	0,16
I	7,90	0,075
II	8,69	0,060
III	8,24	0,070

Оптимальным является состав II, который обладает наименьшей кислотностью, наибольшей устойчивостью и хорошими технологическими свойствами, повышающими производительность МАО и снижающими шероховатость обрабатываемых поверхностей.

Анализ полученных результатов показал, что состав II по сравнению с составами I, III и прототипом СинМА-1 повышает производительность МАО в 1,5–2 раза, а также снижает шероховатость обрабатываемой поверхности в 2,5–3 раза. Кроме того, установлено, что при МАО с использованием состава II процесс обработки происходит более равномерно.

Вывод. В результате проведенных исследований по разработке нового вида СОТС для финишной обработки стали ШХ15 определена рецептура его приготовления (триэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты 0,5, мылонафт 0,6, эмульгатор ОП-10 0,6, тринатрийфосфат 0,3, нитрит натрия 0,3, вода) и установлено повышение производительности процесса резания, обусловленное ростом режущей способности ФАП в присутствии СОТС.

Литература

1. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсионных системах. М., 1977.
2. Сакулевич Ф. Ю., Скворчевский Н. Я. Роль смазывающее-охлаждающих жидкостей при магнитно-абразивной обработке. Мн., 1981.
3. Яцерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Мн., 1988.
4. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность). М., 2002.
5. Вукалович М. П., Новиков И. И. Термодинамика. М., 1972.
6. Куликовский А. Г., Любимов Г. А. Магнитная гидродинамика. М., 2005.
7. Яцерицын П. И., Кожуро Л. М., Ракомсин А. П и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. Мн., 1997.
8. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочное издание / Под ред. В. М. Школьников. М., 1989.

L. M. AKULOVICH, L. E. SERGEEV, E. V. SENCHUROV, V. V. PADALYAK

INFLUENCE OF METALWORKING TECHNOLOGY TOOLS ON PRODUCTIVITY OF MAGNETIC- ABRASIVE MACHINING AND SURFACE ROUGHNESS

Summary

A recipe of a new type of lubricating-cooling technological means for finishing of steel ShKh15 is defined. It was established that productivity increases in magnetic abrasive machining 1,5–2 times, and the roughness of the workpiece is reduced 2,5–3 times.