

СИНЕРГИЯ КОМПОНЕНТОВ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Л.Е. СЕРГЕЕВ, Л.М. АКУЛОВИЧ

**Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь**

Мировой и отечественный опыт показывает, что применение в конструкциях машин деталей со сложным профилем поверхностей позволяет снизить металлоемкость изделий до 30 %. Финишной обработкой таких поверхностей могут быть технологии магнитно-абразивной обработки (МАО). Установлены компоненты рабочей среды (РС), выявлено их взаимное влияние (синергия) при формировании ферроабразивной «щеткой». На основе экспериментальных исследований получены уравнения регрессии, отражающие двойные и тройные взаимодействия параметров РС, что позволило установить синергический эффект взаимного влияния параметров градиента магнитной индукции, магнитной проницаемости ферроабразивного порошка (ФАП) и свойств смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) для шероховатости обработанной поверхности (R_a , мкм) – 46,8 % и для производительности (ΔG , мг/(см²·мин)) – 45,9 %. Установлены рациональные диапазоны параметров МАО, обеспечивающие при комплексном воздействии компонентов РС компромиссный вариант сочетания максимальной производительности обработки и минимальной шероховатости поверхности.

Повышение эксплуатационных показателей машин и механизмов наиболее просто реализуется при использовании в их кинематических цепях деталей со сложным профилем поверхностей (СПП), способных передавать как усилие, так и закон перемещений. Мировой и отечественный опыт показывает, что применение деталей с СПП тел вращения позволяет снизить металлоемкость изделий до 30 % и повысить их конкурентоспособность за счет уменьшения себестоимости и материалоемкости. Усложнение формы поверхностей деталей создает проблемы технологического плана, связанные с обеспечением эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя. Альтернативным вариантом финишной обработки СПП тел вращения могут быть технологии с использованием концентрированных потоков энергии, одной из которых является магнитно-абразивная обработка (МАО). Однако опубликованные работы [1, 2] не содержат результатов исследований в области ковариантности компонентов рабочей среды (РС), что не позволяет целенаправленно управлять процессом МАО с целью обеспечения высокой производительности обработки, снижения расхода дорогостоящих ферроабразивного порошка (ФАП) и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). К компонентам РС относятся: ФАП, из которого формируется режущий инструмент; электромагнитное поле (ЭМП), которое удерживает ФАП в рабочем зазоре

и формирует из него ферроабразивную «щетку»; СОТС, облегчающее процесс резания и повышающее интенсивность срезания неровностей. Взаимное влияние (синергия) компонентов РС состоит в том, что ЭМП формирует цепочечную структуру ферроабразивной «щетке», через которую осуществляется давление на ФАП, что приводит к деформированию обрабатываемой поверхности, управляет углом ориентации ферроабразивных зерен (ФАЗ). Воздействие СОТС проявляется в смачиваемости и охлаждении обрабатываемой поверхности, нагреваемой при возникновении пинч-эффекта, что, в свою очередь, повышает пенообразующую способность СОТС и ее проникающую способность в поровое пространство ферроабразивной «щетке». Наличие ФАП в рабочем зазоре увеличивает его магнитную проницаемость, поскольку зерна ФАП являются ферромагнетиками. Основные двойные и тройные воздействия РС на обрабатываемую поверхность детали представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные воздействия РС на обрабатываемую поверхность детали

Действия	Компонент РС	Характер протекающих процессов
Режущее	ФАП, СОТС	пластическая деформация материала с отделением стружки от матрицы, образование микрорельефа
Диспергирующее	ФАП, СОТС, ЭМП	создание инструмента, состоящего из пористого и твердого тела, расклинивающий эффект
Моющее	СОТС, ЭМП	ускорение адсорбции с образованием многослойных структурных пленок
Смазывающее	СОТС, ЭМП	физическая или химическая адсорбция с образованием граничного слоя
Охлаждающее	СОТС, ЭМП	тепловой на основе теплообмена
Химическое	СОТС, ЭМП	образование химических пленок
Пластифицирующее	ФАП, СОТС, ЭМП	пластическая деформация микрорельефа поверхностного слоя, наклеп
Упрочняющее	ФАП, СОТС, ЭМП	структурно-фазовые переходы, связанные с трансформацией аустенита в мартенсит

Распределение ЭМП электромагнитной системы (ЭМС) в виде графического двумерного представления компьютерной модели, развернутого в пространстве, представлено на рисунке 1.

Таким образом, РС как материальный объект представляет матрицу ФАП, структурированную энергией ЭМП, поровое пространство которой равномерно заполнено водными эмульсионными агентами СОТС и обладающую режущими, охлаждающими, смазочными и другими воздействиями.

В соответствии с принятой методологией исследований основным компонентом РС, обеспечивающим формирование режущего инструмента является ЭМП, которое представляет особый вид материи и характеризуется определенным распределением в пространстве [3]. Наиболее доступным и эффективным методом топографического исследования магнитной индукции ЭМП в рабочем зазоре является компьютерное моделирование. Широкое распространение получили программные комплексы Femm,

позволяющие оптимизировать численное решение системы уравнений Максвелла при использовании метода конечных элементов и существенно сократить сроки разработки и создания алгоритмов. Определение значений магнитной индукции ЭМП в любой точке рабочего зазора, полученных путем компьютерного графического двумерного представления топографии ЭМП, основанных на алгебраическом методе вычисления функции границ ЭМП для разных форм рабочего зазора, позволяет получить более точные зависимости величин градиента магнитной индукции от геометрической формы и размеров рабочего зазора. Установлено, что применение плоских полюсных наконечников имеет высокую эффективность при МАО СПП малогабаритных изделий до 15 мм, эквидистантных полюсных наконечников – при МАО наружных и внутренних сферических поверхностей и конических поверхностей, встречно направленных асимметрично серповидных полюсных наконечников – при МАО наружных поверхностей зубчатых колес и шлицевых поверхностей.

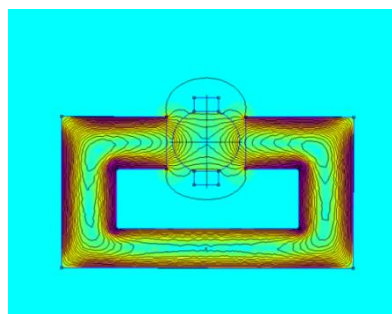
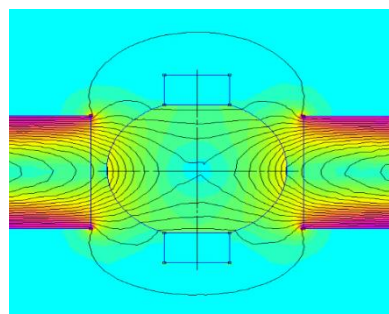
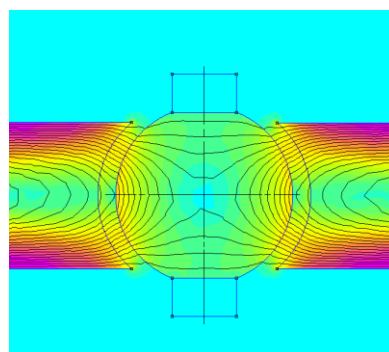
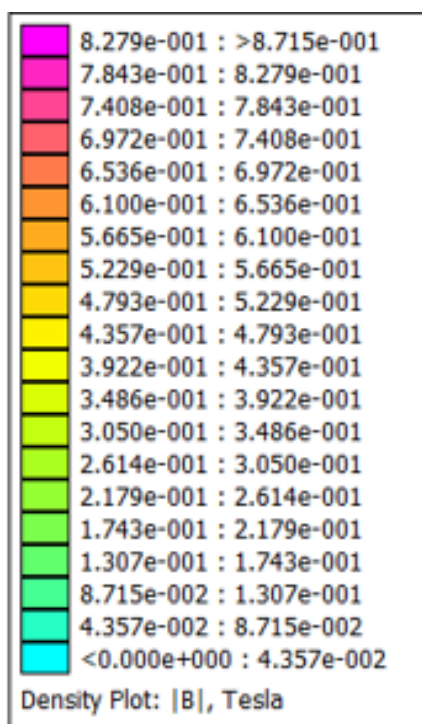


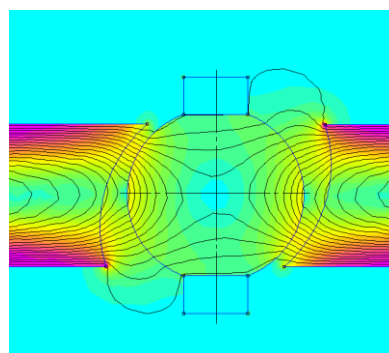
Схема магнитопровода



а



б



в

Форма зазора: *а* – плоский; *б* – эквидистантный; *в* – серповидный

Рисунок 1. – Топография ЭМП в рабочем зазоре различной формы для МАО наружных сферических поверхностей

Повышение эффективности применения ФАП связано с созданием порошков, полученных методом распыления расплава, которое характеризуется высокой скоростью охлаждения $10^5 \div 10^6$ °C/с при наличии большого количества острых режущих микровыступов и кромок. Показатели магнитной проницаемости таких порошков должны превышать 6,5 мкГн/м, режущая способность достигать уровня $5 \div 10$ мг/(см²·мин). На основе перспективных методов изготовления и представленного критерия (абрис режущей кромки) ФАП разработаны их новые виды на базе композиций FeB_x-B_4C , $(Cr,Fe)_7C_3$, $Fe-V_2O_5$, $SiC-Fe_3O_4$, аморфных расплавов $CoBSiNiMnFe$ и быстрорежущей стали Р6М5 для обработки черных и цветных сплавов. Установлено, что профилю отпечатка зерен ФАП Р6М5, FeB_x-B_4C , $(Cr,Fe)_7C_3$, $Fe-V_2O_5$ соответствует абрис эллипсоида вращения, зерен ФАП $CoBSiNiMnFe$ – абрис полного конуса и зерен ФАП $(SiC-Fe_3O_4)$ – абрис конуса с усеченной вершиной, что обеспечивает оценку режущей способности при МАО СПП тел вращения. Применение представленных ФАП повышает стойкость РС в 3÷5 раз и снижает стоимость в 4÷6 раз [4].

В качестве СОТС необходимо использовать класс полусинтетических СОТС, диапазон значений кинематической вязкости которых составляет 30÷40 сСт и в их составе имеется определенное количество (10÷15 %) нефтяных масел. Создание новых видов СОТС в первом варианте производится на основе многофункционального компонента, определяющего практически все их базовые свойства. Например, таким является сульфатированная натриевая соль оксиэтилированной лауриновой кислоты (эмпикол), масс. % 55÷60, что позволяет получить необходимый комплекс свойств по причине увеличения солюбилизующей способности и обеспечивает высокую эффективность при МАО деталей углеродистых и легированных сталей (45, 20ХГСА, 50ХН и 30ХН3А). Второй вариант создания заключается во введении лигносульфонатного компонента, масс. % 10, в базовую структуру СОТС, обладающего высокой реакционной способностью, что обеспечивает высокую эффективность при МАО цветных сплавов (медь М2-М, латунь ЛА67-2 и бронза БрОЦ 4-3). Третий вариант создания состоит в разработке технологии приготовления СОТС на основе оксиэтилированных алкилфенолов (неонол), являющихся неионогенными ПАВ и имеющими высокую поверхностную активность, что приводит к увеличению поверхностного натяжения и вследствие этого регулированию вязкостью адсорбционных слоев и обеспечивает высокую эффективность при МАО алюминиевых сплавов (АЛ1 и Д16).

Путем оптимизации основных параметров процесса МАО СПП тел вращения как механизма самоорганизации, которые описываются регрессионными моделями, основанными на многофакторном планировании экспериментов, получены рациональные диапазоны режимов МАО СПП тел вращения, которые формируют расположение зерен ФАП не хаотично, а по строго ориентированным цепочкам. Использование рациональных режимов МАО СПП тел вращения приводит к самоорганизации цепочек зерен ФАП, которые при заданных ограничениях производят целенаправленное микрорезание. Образование индукционных токов связано с нагревом тонкого поверхностного слоя и обеспечивает рост съема металла. Определяемые ЭДС токи протекают как по поверхностному слою металла, так и по самоорганизованным цепочкам ФАП, что

приводит к разности их электрических потенциалов и в присутствии химически активных СОТС обеспечивает протекание химических реакций на обрабатываемой поверхности с образованием легко удаляемых окисных пленок. Поэтому синергический подход, выявляющий наиболее важные стороны каждого из компонентов РС, обеспечивает интенсификацию МАО СПП тел вращения на основе их самоорганизации. В результате экспериментальных многофакторных исследований, основанных на самоорганизации процессов, получены уравнения регрессии, отражающие двойные и тройные взаимодействия параметров РС, что позволило установить синергический эффект взаимного влияния параметров градиента магнитной индукции, магнитной проницаемости ФАП и свойств СОТС для шероховатости обработанной поверхности (R_a , мкм) – 46,8 % и для производительности (ΔG , мг/(см²·мин)) – 45,9 % и дать их физическое толкование. В результате многофакторного планирования экспериментов установлены рациональные диапазоны параметров МАО ($B = 0,9 \div 1,2$ Тл; $V_p = 1 \div 1,5$ м/с; $V_o = 0,15 \div 0,25$ м/с; $A = 0,5 \div 1$ мм), обеспечивающие при комплексном воздействии компонентов РС компромиссный вариант сочетания максимальной производительности обработки и минимальной шероховатости поверхности. Например, высокая светоотражательная способность (80÷85 %) на таких деталях как рефлекторы и светильники (материал Л63, Л68) достигается применением РС, включающей: ЭМП – эквидистантный зазор, $B = 1,1$ Тл; ФАП на основе быстрорежущей стали Р6М5 (патент РБ № 8085); СОТС на основе лигносульфоната (патент РБ № 23142).

Расширение областей применения МАО СПП тел вращения состоит в реализации обработки: поверхности вращения деталей технологической оснастки (шпиндели); поверхности вращения таких деталей, как пуансоны; поверхности вращения неразвертываемые линейчатые (пазы глубокие прямые, галтели и фаски); поверхности вращения с элементами зубчатого и шлицевого зацепления (зубчатые колеса, валы шлицевые эвольвентные). Практическая проверка результатов исследования на машиностроительных предприятиях показала, что долговечность деталей СПП тел вращения после МАО увеличивается в 1,2÷1,4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоменко, В. А. Магнитно-абразивная обработка метчиков / В. А. Хоменко, А. М. Иконников, А. В. Богданов // Ползуновский вестник. 2012. – № 1. – С. 318–320.
2. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий. – Житомир : ПП «Рута», 2017. – 270 с.
3. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 272 с.
4. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.