

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНЕРГИИ КОМПОНЕНТОВ  
РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ  
ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

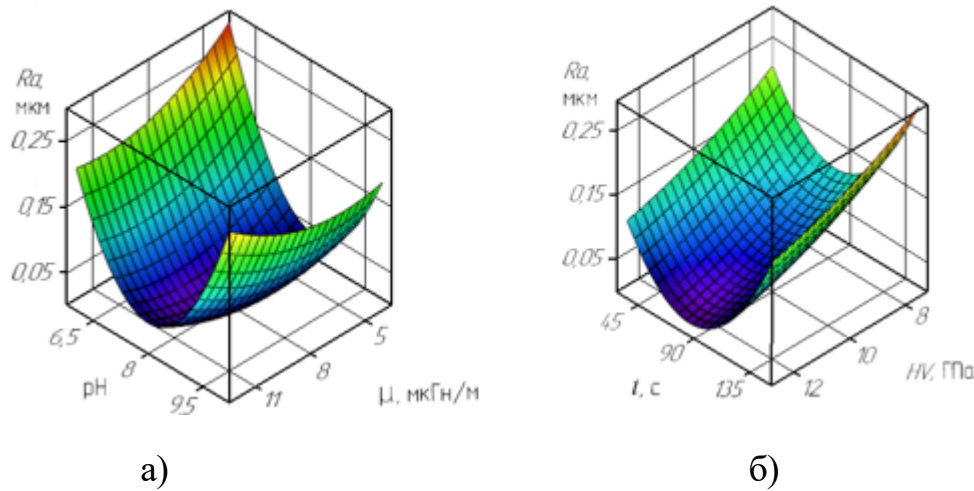
***Л.М. АКУЛОВИЧ, Л.Е. СЕРГЕЕВ***

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

*Приведены результаты исследования моделирования магнитно-абразивной обработки для выявления значимых технологических факторов по критериям их взаимодействия. Установлена количественная оценка синергических эффектов и относительного суммарного вклада одиночных и суммарных факторов. Дано толкование механизма взаимодействия технологических факторов.*

К одному из перспективных способов финишной обработки относится магнитно-абразивная обработка (МАО) [1–2]. Основными параметрами, определяющими его производительность и качество обработанных поверхностей, являются компоненты рабочей технологической среды (РТС): ферроабразивный порошок (ФАП), из которого формируется режущий инструмент; магнитное поле (МП), которое удерживает ФАП в рабочем зазоре и формирует из него абразивную щетку; смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС), облегчающее процесс резания и повышающее интенсивность срезания неровностей. Однако отсутствуют исследования в области ковариантности и синергизма компонентов РТС, что не позволяет целенаправленно управлять процессом МАО с целью обеспечения высокой производительности обработки, снижения расхода электроэнергии, дорогостоящих ФАП и СОТС. Для анализа синергических эффектов компонентов РТС обобщающими параметрами, характеризующими их физические свойства и функциональное назначение, выбраны: градиент магнитной индукции определяет силовое воздействие МП на ферроабразивные зерна по величине и направлению, продолжительность этого воздействия – время обработки; магнитная проницаемость и микротвердость абразива характеризуют магнитные свойства ФАП и режущую способность абразивных зерен; вязкость смазочно-охлаждающей жидкости и водородный показатель (кислотность) формируют технологические свойства СОТС. Синергический подход, выявляющий наиболее важные стороны каждого из компонентов РТС, обеспечивает интенсификацию МАО поверхностей тел вращения на базе ковариантности свойств и их взаимного влияния. Цель исследования заключается в определении количественной оценке синергических эффектов, состоящей в поиске адекватных математических моделей, содержащих параметры, и характеризующих эффект синергизма как взаимовлияния каждого компонента РТС на другой. В связи с этим количественный анализ эффектов си-

нергизма состоит в оценке численных значений параметров математических моделей и обобщенных характеристик, отражающих взаимодействие технологических факторов. Графическое изображение моделей показано в виде двухмерных сечений функции отклика как зависимости шероховатости от водородного показателя  $pH$  и магнитной проницаемости  $\mu$  и от микротвердости абразива  $HV$  и времени обработки  $t$ , рисунок.



а – от водородного показателя  $pH$  и магнитной проницаемости  $\mu$ ;  
 б – от микротвердости абразива  $HV$  и времени обработки  $t$   
 Рисунок 1. – Зависимость шероховатости после МАО

Установлено, что взаимное влияние компонентов РТС состоит в том, что МП осуществляет создание и формирование цепочечной структуры ферроабразивной «щетки», что определяет давление на ФАП, градиент МП управляет углом ориентации ФАП при срезании неровностей на обрабатываемой поверхности. Воздействие СОТС заключается в обеспечении смачиваемости обрабатываемой поверхности, возникновении пинч-эффекта, который приводит к тепловому воздействию на поверхностный слой обрабатываемой детали, её нагреву, что в свою очередь повышает пенообразующую способность СОТС и ее проникающую способность в поровое пространство ферроабразивной «щетки». ФАП определяет увеличение магнитной проницаемости МП в зоне границы двух сред, поскольку это связано с наличием ферромагнетика во внешнем магнитном поле. Поровое пространство цепочечной структуры ФАП оказывает важное влияние на сводовую кольматацию агентами СОТС, поскольку стабилизирует режущие свойства ФАП и на основе установившегося теплообмена поддерживает постоянство съема материала. Оценка относительного вклада факторов МАО показала, что количественно синергический эффект в результате их взаимодействия составляет для шероховатости обработанной поверхности ( $R_a$ ,  $\mu\text{м}$ ) – 46,8 % и для производительности ( $\Delta G$ ,  $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ ) – 45,9 %. Относительный суммарный вклад одиночных факторов имеет численное значение – для шероховатости ( $R_a$ ,  $\mu\text{м}$ ) – 29,1 %, а для производительности ( $\Delta G$ ,  $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ ) – 48,2 %. Например, влияние ФАП на МП определяется двойным факторным взаимодействием  $HV \cdot t$  (микротвердость

абразива,  $HV$ , ГПа и время обработки,  $t$ , с). Повышение температуры в зоне обработки с увеличением времени  $t$  приводит к магнитному насыщению цепочечных кластеров, что связано со снижением магнитной проницаемости ФАП. Величина микротвердости абразива  $HV$  зависит от размера и морфологии зерен ФАП, которые определяют степень пористости ферроабразивной «щетки». Поскольку область с наиболее высокими градиентами МП находится у стенок пор, то в процессе эксплуатации ФАП и его износа, определяемого микротвердостью  $HV$ , изменяются соответственно форма и размеры зерен, следовательно, и пористость. Поскольку также изменяется магнитная проницаемость РТС, то происходит отклонение угла наклона зерна ФАП относительно плоскости резания, что определяет формирование шероховатости поверхностного слоя материалов. Снижение магнитной проницаемости из-за разрушения ФАП и увеличение плотности упаковки по различным локальным участкам зоны обработки связаны с вариацией его магнитной проницаемости, что приводит к отклонению положения оси зерна относительно магнитных силовых линий, вызывая изменение угла наклона зерна. Распределение и ориентация зерен ФАП в соответствии с градиентом магнитной индукции по обрабатываемой поверхности обеспечивает давление инструмента на обрабатываемую поверхность, что определяет требуемую шероховатость поверхностного слоя.

**Выводы:** Выявлено, что увеличение времени обработки способствует росту шероховатости и для обеспечения требуемой шероховатости и повышения производительности нужно использовать время обработки, равное 90 с. Установлено взаимовлияние компонентов РТС, которое определяется двойными факторными взаимодействиями с использованием метода планирования эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.
2. Полищук, В. С. Магнитно-абразивная обработка – высокоэффективный метод в машиностроении / В.С. Полищук // Физика и техника высоких давлений. – 2003. – № 1. – С. 127–138.