

конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2023)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2023. – 308 с. (С. 20–32).

4. Ажар А. В., Дулуб А. Д., Сивак М. В. Оценка ресурса сборного комбинированного инструмента по временной стойкости и количеству обработанных отверстий. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ – 2023». Сборник материалов X Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 09–10 ноября 2023 года. – Т. 1. – Минск: БНТУ, 2023. – 176 с. (С. 50–52).

5. Степанов М. С., Иванова М. С. Разработка математической модели выбора наиболее выгоднейших режимов резания комбинированным осевым инструментом. Машиноведение и машиностроение. Технологический аудит и резервы производства. – № 4/1(24) – 2015. – С. 69–72.

6. Ажар А. В., Кочергин А. И. Использование и оптимизация условий эксплуатации комбинированных осевых инструментов. Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып. 18 – С. 34–42.

7. Ажар А. В., Кочергин А. И., Ратько Е. Ф. Оптимизация условий обработки ступенчатых отверстий осевыми инструментами на примере комбинированных зенкеров. Машиностроение. – Мн., 2009. – Вып. 25. – С. 283–291.

8. Ажар А. В. Анализ структурно-технологической надежности комбинированных осевых инструментов / А. В. Ажар, О. К. Яцкевич, Л. А. Колесников // материалы МНТК «Машина-созликда фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг интеграцияси: тенденциялар, муоммолар ва ечимлар», 19.05.2022, Ташкент. – 2022. – 286 с. (С. 220–225).

9. Попов А. П., Свириденко Д. С., Комаров Ю. Ю. Прогресс в применении осевых комбинированных инструментов. Мир транспорта. 2017; 15(6):88–101. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-8>. – Дата обращения: 12.11.2023.

10. Жарликов Н. В. Комбинированные режущие инструменты. – М. Свердловск: Машгиз. Урало-Сибирское отд-ние, 1961. – 78 с.

11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. Дальского А. М., Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К., Сулова А. Г. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 2003. – 944 с.

12. Учебное пособие «Технология обработки металлов резанием». 2017.11. – Режим доступа: https://xn---2100-ywvwxrka13ag0c.xn--p1ai/uploadedFiles/files/Training_Handbook_RUS_2-compressed.pdf.pdf. – Дата обращения: 12.11.2023.

Поступила 12.12.2023

УДК 621.923.04

Акулович Л. М., Сергеев Л. Е.

**СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье показано, что формирование топографии поверхностей пар трения, снижающей износ сопрягаемых поверхностей деталей, происходит при их изготовлении на операциях финишной абразивной обработки, среди которых одной из перспективных является магнитно-абразивная обработка эластичным инструментом. Предложен метод повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения, основанный на выявлении эффектов взаимодействия технологических факторов и их синергизма. Приведены результаты экспериментальных исследований многокритериальной оптимизации технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения в виде многофакторных уравнений, количественно описывающих вклад каждого

обобщенного фактора в синергический эффект, что позволяет интенсифицировать процесс срезания неровностей в труднодоступных участках сложного профиля.

Введение. Повышение силовых и скоростных параметров машин и механизмов наиболее просто реализуется использованием в их кинематических цепях деталей со сложным профилем поверхностей (СПП), способных передавать как усилие, так и закон перемещений. СПП применяют в конструкциях изделий машино-, приборо-, станко-, авиа-, судостроения, оборудовании по переработке сельскохозяйственного сырья, а также в изделиях бытового назначения [1–2]. Особую «платформу» (до 70 %) в общем объеме СПП занимают тела вращения. К ним относятся: в мобильных машинах – детали с наружными и внутренними неполными сферическими поверхностями (шаровые опоры и пальцы шарниров рулевого управления, беговые дорожки подшипников качения); в металлорежущих станках – шпиндели и оправки, имеющие поверхности с высокими требованиями по точности и шероховатости обработанной поверхности; зубчатые колеса. Объем производства шаровых пальцев автомобилей МАЗ за 2020 г., согласно данных журнала «Autoversity» составил более 20 тыс. единиц, а по данным ежегодных отчетов выпуск токарных станков в 2025 году достигнет 1,9 млн. единиц.

Достигнутый в настоящее время уровень технологии формообразования поверхностей сложного профиля базируется на использовании станков с ЧПУ, однако при этом для финишной абразивной обработки требуется создание дорогостоящих специальных инструментов, у которых профиль режущей кромки должен геометрически или программно отражать топологию обрабатываемой поверхности. При обработке таким инструментом поверхностей с переменной кривизной изменяются значения фактических углов резания и, как следствие, давление инструмента и скорость резания на различных участках контура деталей имеют разные значения. В результате на отдельных участках обрабатываемых поверхностей возникают дополнительные погрешности формы и разброс параметров шероховатости, что приводит к неоднородности показателей качества и необходимости дополнительных, в основном ручных, доводочных операций.

Формирование микропрофиля поверхностей деталей происходит при их изготовлении на операциях финишной обработки, доля которых в производственных процессах постоянно увеличивается в связи с внедрением технологий изготовления заготовок (обработка давлением, точное литье, порошковая металлургия и т. п.), снижающих припуски на механическую обработку [3]. Современное машиностроение располагает достаточно большим числом методов и способов формирования рабочих поверхностей деталей машин с обеспечением заданных шероховатости и физико-механических свойств, в том числе пластическое деформирование поверхностного слоя [4; 5], механическая обработка лезвийными и абразивными инструментами [6], электрофизические и электрохимические методы [7]. Однако по производительности и экологическим соображениям доминирующим финишным методом остается механическая абразивная обработка, которая нередко является единственно возможным методом обеспечения требуемого качества поверхности.

По виду режущего инструмента существующие методы финишной абразивной обработки поверхностей можно разделить на обработку закрепленным, свободным и подвижно-координированным абразивным зерном. При любом способе финишной абразивной обработки важнейшим фактором является возможность изменять давление частиц абразивного порошка на обрабатываемую поверхность заготовки. В незакрепленном состоянии частицы абразива более полно используют свои режущие способности, так как происходит нивелирование их рабочих кромок относительно обрабатываемой поверхности. К одному из перспективных способов финишной обработки эластичным инструментом относится магнитно-абразивная обработка (МАО). В про-

цессе МАО ферроабразивные зерна (ФАЗ) в свободном состоянии помещают в магнитное поле, под действием которого они ориентируются так, что к обрабатываемой поверхности обращены их наиболее острые кромки. В результате этого на протяжении всего цикла обработки имеет место процесс ориентированного абразивного резания эластичным инструментом. Под действием магнитного поля в процессе обработки происходит переориентация незакрепленных ФАЗ, которые стремятся сориентироваться наибольшей осью перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Для реализации МАО не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править, что в 2–3 раза снижает затраты на инструмент. МАО обеспечивает шероховатость поверхности по параметру $Ra = 0,01 \dots 0,4$ мкм, снижение температуры резания по сравнению с традиционными методами абразивной обработки, что способствует образованию нового качества поверхности и структуры поверхностного слоя.

Постановка задачи исследования. Ранее проведенные исследования позволили создать технологии МАО и оборудование для ее реализации, в основном, деталей простой геометрической формы. Что касается финишной обработки СПП, то достигнутый уровень исследований позволил разработать технологии и оборудование для МАО режущих лезвийных и медицинских инструментов, лопаток газотурбинных двигателей, базирующиеся на использовании больших кольцевых зазоров и индукторов на постоянных магнитах (ИПМ). Однако такой подход для обработки СПП тел вращения является неэффективным из-за низкой производительности, высокого энергопотребления из-за использования крупногабаритных электромагнитных систем (ЭМС), большого расхода дорогостоящего ферроабразивного порошка (ФАП). Вместе с тем, оптимизировать традиционными методами параметры и режимы технологического процесса МАО не представляется возможным, так как однозначно прогнозировать результаты обработки невозможно из-за особенностей динамической модели процесса МАО, состоящих в том, что:

- ФАЗ имеют стохастическую геометрию и при МАО случайным образом распределены на обрабатываемой поверхности;
- режущая способность ферроабразивной щетки зависит от степени уплотнения ФАЗ, что также носит стохастический характер;
- интенсивность резания каждым ФАЗ зависит как от степени воздействия магнитного поля на компоненты рабочей технологической среды, так и от магнитной проницаемости ФАЗ, а также от свойств смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Указанные особенности дают основание процесс МАО уподобить открытой нелинейной самоорганизующейся системе [8], подверженной колебаниям, в результате которых она развивается и движется к относительно устойчивому состоянию. Этому способствует постоянный энергетический и материальный обмен системы с окружающей средой. В сложившихся условиях становится актуальной задача разработки МАО СПП тел вращения комплексным воздействием компонентов рабочей технологической среды (РТС) с учетом синергизма их свойств.

Цель настоящего исследования: интенсифицировать энергетический и материальный обмен в системе «Обрабатываемая поверхность детали – рабочий зазор – полюсный наконечник магнитопровода», для чего установить наиболее коррелирующие между собой технологические параметры рабочей технологической среды МАО и дать количественную оценку их взаимовлияния и относительного вклада в синергический эффект.

Методика исследований. При решении подобных задач, как правило, показатели качества и производительности являются конфликтующими параметрами, оптимальные значения которых достижимы при различных значениях управляющих факторов. Поэтому оптимизация технологического процесса требует поиска варианта, компромиссного по обоим критериям. Эффективной методологией решения этой проблемы является

на первом этапе математическое моделирование, основанное на получении многофакторных уравнений, описывающих поведение технологического процесса, и его многокритериальную оптимизацию с помощью построенной математической модели. На втором этапе – управление процессом MAO, направленным на стабилизацию и равномерность давления ФАЗ по всей площади СПП тел вращения изменением потоками магнитной индукции с организацией обратных связей. Интенсификация удаления выступающих на обрабатываемой поверхности неровностей при MAO связана как с необходимостью создания новых видов СОТС и ФАП, так и с разработкой метода расчета топографии МП и управления величиной его градиента.

Основная часть. Сложившееся положение в области технологии MAO СПП тел вращения вызвано отсутствием научно обоснованных параметров РТС, включающей компоненты: ФАП, из которого формируется режущий инструмент; магнитное поле (МП), которое удерживает ФАП в рабочем зазоре и формирует из него абразивную «щетку»; смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), облегчающие процесс резания и повышающие интенсивность срезания неровностей. В то же время у исследователей о режущем инструменте при MAO сложилось устойчивое представление только как о ФАП без учета роли СОТС, МП и синергизма компонентов РТС. Это часто приводит к ошибкам при выборе параметров и назначении режимов MAO, а в результате – к непроизводительным потерям и пониженным эксплуатационным свойствам деталей.

Экспериментально установлено, что применяемые ФАП, полученные методом «керметной технологии», а также механические смеси, имеют недостаточные магнитную проницаемость, микротвердость и период стойкости. Эти показатели свойств ФАП при их высокой стоимости являются аргументом проведения научных исследований в направлении создания новых структур и свойств ФАП. Для повышения производительности MAO и качества поверхностей требуется управление градиентом магнитной индукции в зоне резания при минимальных размерах концентраторов магнитного поля и их правильном расположении относительно обрабатываемого изделия. Используемые при MAO масляные СОТС имеют низкие показатели фильтрации при обработке труднодоступных участков СПП, что приводит к высокой степени сводовой кольматации РТС и быстрой потере режущей способности. Синтетические СОТС имеют высокую стоимость, низкие смазывающее, диспергирующее и пластифицирующее действия, неравномерность распределения порции по объему РТС. Проблема повышения производительности MAO СПП тел вращения и качества обработанной поверхности заключается в научном обосновании рациональных параметров РТС с учетом синергизма их параметров, обеспечивающих микрорезание постоянно обновляющимися режущими кромками зерен ФАП при реализации принципа самозатачивания. При этом принято допущение, что ФАЗ контактируют с обрабатываемой поверхностью по вершинам микронеровностей, которые являются концентраторами силовых линий МП.

На основании проведенного анализа выявлена необходимость:

- создания новых видов ФАП и СОТС, имеющих повышенные абразивные, магнитные, смазочные, охлаждающие и моющие свойства;
- установления механизма и методов активирования MAO СПП тел вращения;
- определения оптимальных параметров компонентов РТС, обеспечивающих синергизм их свойств и самоорганизацию процесса срезания неровностей поверхности;
- формирования топографии магнитного поля в зоне резания для обеспечения заданных геометрических и физико-механических свойств поверхностного слоя после MAO.

Сложность расчета МП для MAO СПП обусловлена нестационарностью градиента магнитного потока в рабочей зоне, вызванной его изменением в пространстве и во времени. На основе анализа цепных и полевых методов расчета магнитных систем установлено, что исследования пространственного распределения магнитного потока в рабочем

зазоре сложного профиля целесообразно проводить как математическим моделированием, так и компьютерным моделированием с использованием программы Femm, а также экспериментальными методами для решения осесимметричных задач [9]. Это аргументировано тем, что цепные методы расчета обеспечивают большую погрешность, поскольку модель трехмерного МП заменяется упрощенной. Аналитические методы требуют трудоемких вычислений, а в ряде случаев их применение невозможно. Результат решения системы уравнений Максвелла был определен выбором граничных условий при том, что модельное решение имеет большое количество ограничений и подразумевает ряд допущений, поэтому полученные результаты являются оценочными. Однако установление напряженности магнитного поля H в любой точке рабочего зазора обеспечивает одинаковый диапазон значений магнитной индукции B на каждом локальном участке, что позволяет определить пространственное расположение магнитного потока в рабочем зазоре и рациональную конструкцию магнитопровода в зависимости от выбранной технологической схемы обработки.

Численное решение полученных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных осуществляли методом конечных элементов с использованием программных комплексов Femm 4.2. Это позволяет получить более точные зависимости величин градиента магнитной индукции от геометрической формы и размеров рабочего зазора, существенно сократить сроки разработки конструкций магнитных систем. Также были проведены исследования пространственного распределения магнитного потока в рабочем зазоре с использованием экспериментальных методов для решения осесимметричных задач. Полученные результаты этих исследований позволили установить, что наиболее действенным способом изменения плотности магнитного потока в рабочем зазоре является регулирование межполюсного расстояния, что обеспечивает самоформирование в рабочем зазоре режущего контура абразивной «щетки» адекватно заданной форме обрабатываемой поверхности.

Распределение магнитного поля ЭМС в виде двумерной модели, развернутой в пространстве, представлено на рис. 1.

В области плоского зазора наибольшая концентрация линий магнитной индукции достигается в его средней части между поверхностью разрыва магнитопровода и максимальным диаметром неполной сферы исследуемого образца (0,74 Тл). На верхней и нижней границах рабочего зазора величина магнитной индукции у поверхности разрыва магнитопровода составляет величину (0,16–0,18) Тл. Изменение рабочего зазора на два порядка (от 0,5 мм до 5 мм) существенно уменьшает величину поля до 0,05 Тл. В пространстве вне рабочего зазора происходит выпучивание магнитного потока, заключающееся в вытеснении магнитного потока из рабочего зазора и образовании флюксации, величина которой равна 0,13 Тл, что достигает порядка 15 % от общей величины магнитного потока (рис. 1, а).

В эквидистантном зазоре (рис. 1, б) наблюдается достаточно равномерное распределение магнитного поля по радиусу объекта и низкий уровень образования флюкул за границами рабочего зазора. Сближение полюсов электромагнита и образующей сферической поверхности ограничивается длиной цепочек, создающих необходимую магнитодвижущую силу. Распределение магнитной индукции при зазоре 0,5 мм и 5 мм составляет значения 0,69 Тл и 0,071 Тл соответственно.

При использовании встречно направленных асимметрично серповидных наконечников (рис. 1, в) величина магнитной индукции на поверхности разрыва магнитопровода у верхней границы рабочего зазора составляет 0,57 Тл, на нижней – 0,83 Тл, в средней части – 0,72 Тл. При величине рабочего зазора $\delta = 1$ мм происходит наиболее равномерное распределение магнитного поля в рабочей зоне (от 0,83 Тл до 0,33 Тл). При увеличении зазора до 5 мм наблюдается плавное уменьшение магнитной индукции от 0,83 Тл до

0,25 Тл. В пространстве вне рабочего зазора происходит выпучивание магнитного потока, заключающееся в его вытеснении из рабочего зазора и образование флюкуляции, величина которой равна 0,07 Тл, что составляет около 7 % от общей величины магнитного потока.

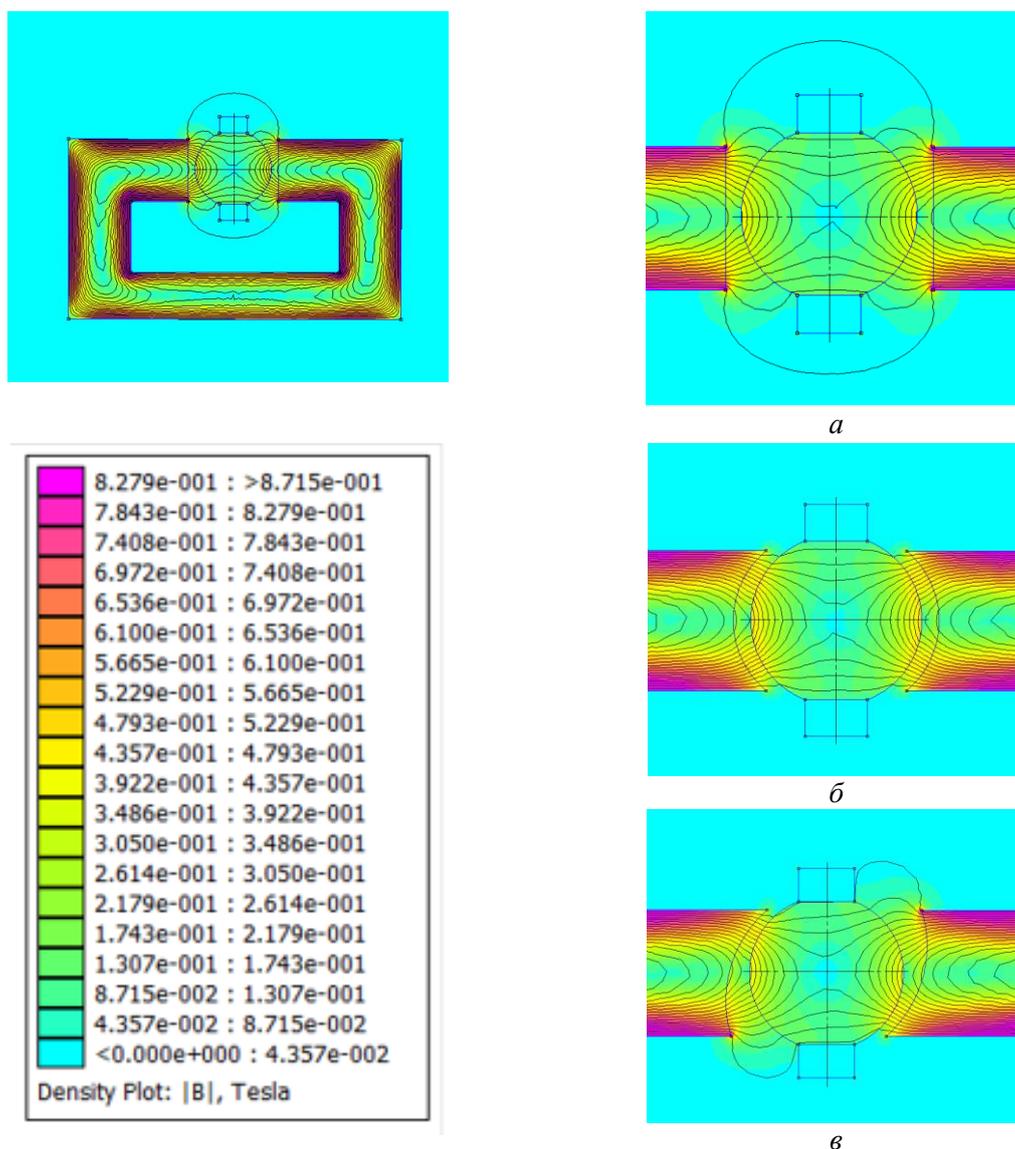


Рис. 1. Топография МП в рабочем зазоре при МАО наружных сферических поверхностей:
а – плоский; *б* – эквидистантный; *в* – серповидный

Концентрации градиента магнитной индукции оказывают влияние на стружкообразование. Экспериментально установлено, что оптимальные условия стружкообразования при размерности зерен ФАП $\Delta = (160 / 125)$ мкм обеспечивают глубину резания (0,28–0,51) мкм при величине магнитной проницаемости РТС в зазоре (8–20) мГн/м. Экспериментально подтверждено увеличение режущей способности ФАП, при котором (60–75) % вытесняемого ферроабразивным зерном металла переходит в микростружку, что вызвано действием теплового эффекта, возникающего от индукционных токов в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала (рис. 2). В результате исследования процесса микрорезания единичным зерном выявлено, что глубина царапины при наложении магнитного поля увеличивается в (1,5–1,6) раза.

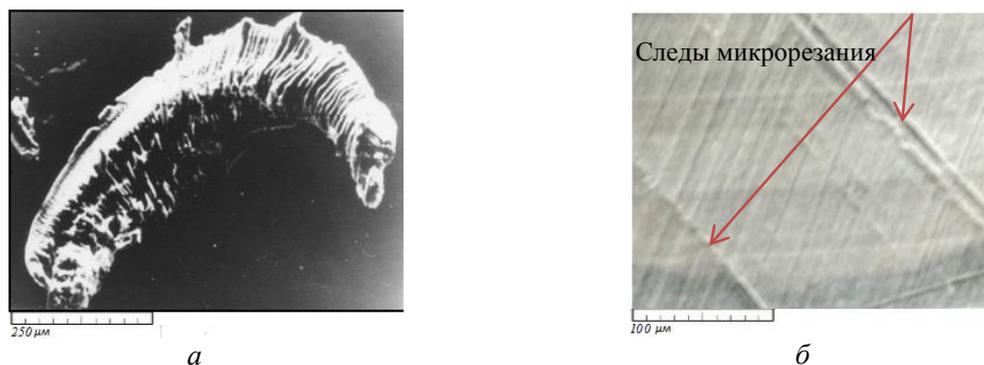


Рис. 2. Форма стружек (x250) (а) и следы микрорезания (x100) (б) после МАО

Одновременно абразивному резанию способствует снижение предела текучести материала, связанное с проявлением магнитоэластического эффекта [10]. Проведенные исследования стружкообразования при МАО показали, что критерием использования геометрических фигур в качестве моделей ФАЗ должна быть форма режущей кромки. Анализ формы ФАЗ, полученных методом распыления состава, показывает, что наибольшей степенью взаимодействия зерна и обрабатываемой СПП обладают форма в виде эллипсоида вращения. Установлена зависимость между величиной площади поперечного сечения зерна S , глубиной его внедрения h , радиусом округления режущей кромки ρ и углом ε при вершине:

$$S = 0,179 \times h^{0,896} \times \rho^{0,567} \times \varepsilon^{0,508}. \quad (1)$$

Экспериментально установлено, что наиболее эффективными для МАО СПП являются ФАП с ферромагнитной матрицей, полученные методом распыления и покрытые прочной химически инертной абразивной оболочкой, а также содержащие включения тугоплавких карбидов, оксидов, боридов. Показатели магнитной проницаемости таких ФАП превышают 6,5 мкГ/м, абразивная способность достигает уровня (5–10) мг/(см²·мин), что позволяет обеспечить их проникновение в труднодоступные участки СПП тел вращения для достижения требуемых показателей производительности и качества процесса МАО.

На удаление выступов неровностей существенное влияние оказывают СОТС. В настоящее время для МАО сложнопрофильных поверхностей в качестве СОТС применяют эмульсии на основе эмульсолов ЭТ, ЭГТ, Э–2. Однако наличие грубодисперсной (10⁻¹–1) мм фазы таких эмульсий приводит к быстрому прекращению фильтрации СОТС ферроабразивной «щетки», сопровождающемуся разрушением ФАЗ, полученных «керметной технологией» и образованием субстрата, состоящего из субмикронных ферромагнитных частиц Fe определенной концентрации и срезаемой стружки. Подобное разрушение приводит к резкому повышению центров кристаллизации масляных глобулей, и парафинированные масляные глобули выпадают в виде тонкодисперсной и объемной взвеси, осаживаемой на микрорельефе зерен ФАП, что уменьшает режущую способность. Альтернативой эмульсолам ЭТ, ЭГТ, Э–2 предложены синтетические СинМА–1 и СинМА–2 ТУ 38.5901176–91, изготовленные на основе ПАВ и синтетических жирных кислот, но они не обеспечивают такой производительности, как эмульсии. При этом наблюдается повышенный износ зерен ФАП. Размер дисперсной фазы частиц синтетических СОТС (СинМА–1) составляет (10⁻⁴–10⁻⁶) мм, полусинтетических – (10⁻²–10⁻³) мм, масляных (ЭГТ, Э–1, Э–2) – (10⁻¹–1) мм соответственно. Проведенный расчет величины пор в ферроабразивной «щетке» с размерностью зерен (0,1–0,16) мм показывает, что не-

возмущенный диаметр поперечного сечения порового канала не превышает 0,02 мм. Поэтому в качестве СОТС для МАО СПП рекомендуется применять полусинтетические СОТС, диапазон значений кинематической вязкости которых составляет (30–40) сСт, а в их составе имеется (5–10 %) нефтяных масел. Созданы новые виды полусинтетических СОТС с применением сульфатированной соли лауриновой кислоты $C_{12}H_{25}SO_4Na$, мас. % (55–60), что позволяет получить необходимый комплекс свойств по причине высокой стойкости пенного столба. Результаты испытаний показали высокую эффективность при обработке деталей из подшипниковой стали. Вторым вариантом заключается в создании лигносульфонатного компонента, мас. % 10, в базовой структуре СОТС, обладающего высокой реакционной способностью. Проведенные испытания МАО стали 20 показали высокую эффективность СОТС с наличием лигносульфонатного компонента при уменьшении расхода СОТС на 20 % соответственно. Проведенные испытания данного вида СОТС показали, что производительность процесса МАО алюминиевых сплавов АЛ–6 и Д16 в среднем на 1,5 и 1,6 раза выше, чем СинМА-1.

Кроме влияния каждого компонента РТС на результаты МАО, экспериментально установлено проявление эффектов их взаимодействия, заключающихся в том, что изменение некоторого технологического параметра одного компонента РТС приводит к самоорганизованному изменению технологических параметров других компонентов РТС, что в конечном итоге приводит к изменению в целом свойств РТС. На основе анализа экспериментальных данных по выявлению эффектов взаимодействия в качестве управляющих факторов при МАО определены обобщенные параметры компонентов РТС (таблица). Градиент магнитной индукции B определяет силовое воздействие МП на ФАЗ по величине и направлению, а время обработки t – продолжительность этого воздействия; магнитная проницаемость μ и микротвердость HV абразива связаны с магнитными свойствами ФАП и режущей способностью ФАЗ; вязкость СОЖ γ ; водородный показатель (кислотность) pH характеризуют технологические свойства СОТС.

В результате проведенных исследований получены уравнения регрессии в нормированных координатах (2) и (3), определяющие зависимости шероховатости поверхности Ra , мкм и производительности процесса МАО ΔG , мг/(см²·мин) от управляющих технологических факторов, что позволило установить синергический эффект взаимодействия компонентов РТС при МАО беговых дорожек шариковых подшипников и определить относительный вклад каждого из физических управляющих факторов: в повышение производительности (ΔG , мг/(см²·мин) при двухфакторных взаимодействиях ($\mu \cdot HV$ – 9 %, $\mu \cdot pH$ – 6,5 %) и трехфакторных ($B \cdot \mu \cdot pH$ – 7,5 %, $B \cdot \mu \cdot HV$ – 4 %); в достижение требуемой шероховатости поверхности ($Ra = 0,1$ мкм) – при двухфакторных взаимодействиях ($\mu \cdot HV$ – 8,2 %, $\mu \cdot pH$ – 4 %) и трехфакторных ($B \cdot \mu \cdot pH$ – 5 %, $HV \cdot \gamma \cdot t$ – 3,8 %), рис. 3.

Оценка относительного вклада факторов МАО показала, что количественно синергический эффект в результате их взаимодействия составляет для шероховатости обработанной поверхности (Ra , мкм) – 46,8 % и для производительности (ΔG , мг/(см²·мин) – 45,9 %. Относительный суммарный вклад одиночных факторов имеет численное значение – для шероховатости (Ra , мкм) – 29,1 %, а для производительности (ΔG , мг/(см²·мин) – 48,2 %. Взаимное влияние или синергия компонентов РТС состоит в том, что МП осуществляет формирование цепочечной структуры ферроабразивной «щетки», что определяет давление на ФАП и приводит к деформированию срезаемого слоя обрабатываемой поверхности. 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 «щетки». ФАП определяет степень увеличения магнитной проницаемости рабочего зазора как зоны на границе двух сред.

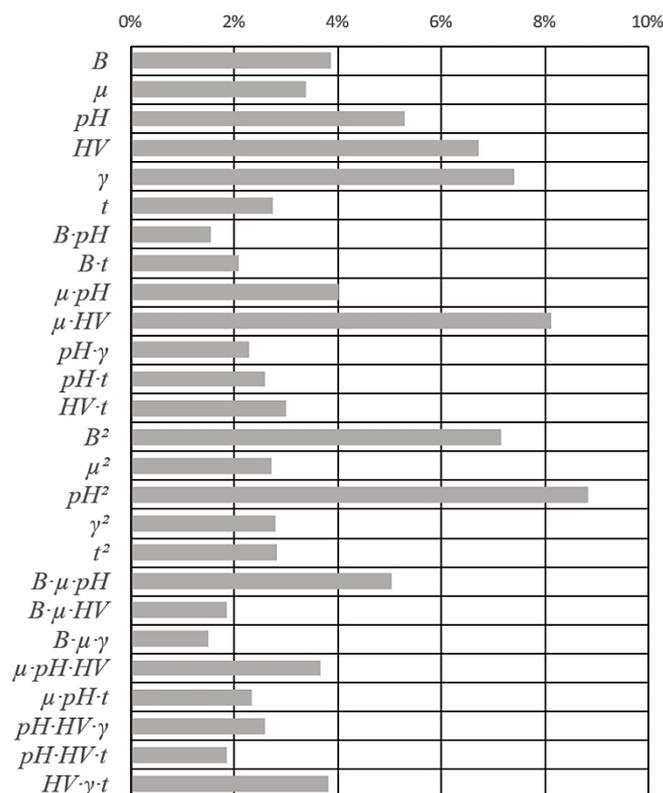


Рис. 3. Относительный вклад факторов МАО и их взаимодействий в изменение шероховатости обработанной поверхности в процессе МАО

$$\begin{aligned}
 Ra = \exp(-2,3649 - 0,0831X_1 + 0,0729X_2 - 0,1139X_3 + 0,1450X_4 + 0,1597X_5 + \\
 + 0,0591X_6 - 0,0332X_1X_3 - 0,0448X_1X_6 + 0,0869X_2X_3 - 0,1752X_2X_4 + \\
 + 0,0493X_3X_5 - 0,056X_3X_6 - 0,0648X_4X_6 + 0,154X_1^2 + 0,0587X_2^2 + \\
 + 0,1904X_3^2 + 0,0601X_5^2 + 0,0609X_6^2 + 0,1088X_1X_2X_3 - 0,0401X_1X_2X_4 - \\
 - 0,0322X_1X_2X_5 - 0,0788X_2X_3X_4 + 0,0502X_2X_3X_6 - 0,0561X_3X_4X_5 + \\
 + 0,0398X_3X_4X_6 - 0,0823X_4X_5X_6,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta G = \exp(-1,3527 + 0,0976X_1 + 0,1457X_3 - 0,0522X_4 + 0,0542X_6 - \\
 - 0,025X_1X_2 - 0,0213X_1X_3 - 0,0383X_1X_4 - 0,0288X_1X_5 - 0,0415X_2X_3 + \\
 + 0,063X_2X_4 - 0,0215X_2X_6 - 0,0438X_1^2 - 0,0567X_1X_2X_3 - 0,0286X_1X_2X_4.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Выявлено, что по степени влияния как на отдельные параметры, так и на их совокупность в порядке убывания значимости технологические факторы МАО располагаются в ряды (4) и (5), которые показывают, что влияние технологических факторов на производительность (G) аналогично влиянию на шероховатость (Ra).

$$\Delta G: pH \rightarrow B \rightarrow t \rightarrow HV, \tag{4}$$

$$Ra: \gamma \rightarrow HV \rightarrow pH \rightarrow B \rightarrow \mu \rightarrow t. \tag{5}$$

Порядок значимости основных технологических факторов показывает, что на характеристики тонкой кристаллической структуры (σ_1 , σ_{II} и D), обеспечивающие рост физико-механических и эксплуатационных свойств СПП тел вращения, наибольшее влияние оказывает зернистость порошка. Математико-статистические модели активированного процесса MAO, которые были получены центральным композиционным ротатабельным униформ-планированием экспериментов, обеспечили установление рациональных диапазонов технологических параметров. Путем оптимизации основных параметров как механизма самоорганизации, которые описываются регрессионными моделями, основанными на многофакторном планировании экспериментов, получены рациональные диапазоны режимов обработки, что приводит к не хаотичному расположению зерен ФАП, а по строго ориентированным цепочкам. Осуществление процесса микрорезания постоянно обновляющимися режущими кромками зерен ФАП на основании предлагаемых режимов MAO обеспечивает интенсификацию массы срезаемого металла и качества обработки. Установлено, что для повышения производительности G необходимо применять следующие значения технологических режимов: $B > 0,8$ Т, $A > 2$ мм, $V > 0,25$ м/с, $V_p = 2-4$ м/с; для снижения шероховатости обработанной поверхности Ra: $V_o = 0,6-1,0$ м/с, $V_p = 2-4$ м/с, $t = 40-70$ с, $Ra_o = 0,4-0,8$ мкм. Использование рациональных режимов технологических параметров, обеспечивающих компромиссный вариант сочетания максимальной производительности обработки и минимальной шероховатости поверхности при комплексном воздействии компонентов РТС, приводит к самоорганизации цепочек зерен ФАП, которые производят целенаправленное микрорезание при реализации принципа самозатачивания. Установлено, что формирование микрорельефа поверхности при MAO определяется комплексным воздействием магнитного, абразивного и физико-химического факторов, состоящем в проявлении магнитно-пластического эффекта, возникновении индукционных токов, инициируемых воздействием МП, и образовании окисных пленок.

Первоначально изменение высоты микронеровностей характеризуется их резким уменьшением, которое осуществляется преимущественно абразивным резанием. На последующей стадии уменьшение высоты микронеровностей происходит путем сглаживания вершин микровыступов, сформированных в период абразивного резания и удаления окисных пленок. Снижение высоты микронеровностей и увеличение радиуса их округления не сопровождается изменением их шага, микрорельеф поверхности характеризуется шероховатостью $Ra = (0,02-0,08)$ мкм. Сформированный MAO слой отличается уменьшением микротвердости по мере удаления от поверхности и повышением микротвердости, по сравнению с исходной, до 20 % при глубине ее распределения (20–40) мкм. Металлографическим анализом установлено, что содержание остаточного аустенита в поверхностном слое, составляющем (50–100) мкм, снижается в среднем в 1,4 раза по сравнению с результатами MAO СПП, полученных другими исследователями. Рентгеноструктурные исследования показали, что при MAO СПП осуществляется увеличение остаточных сжимающих напряжений по сравнению с результатами, полученными другими исследователями, в среднем на 30 %.

В результате испытаний на износостойкость образцов из легированных сталей установлено, что после MAO СПП коэффициент трения уменьшается на (15–20) %, а средняя интенсивность изнашивания составила $8,2 \cdot 10^{-8}$ мкм/км. В ходе исследований установлено, что образцы СПП, обработанные MAO, после 288 часов коррозионных испытаний, имели покрытие продуктами коррозии только на 61 % в отличие от образцов – после токарной обработки, термообработки и шлифования, процент покрытия продуктами коррозии которых составил 93, 82, 73 соответственно, что показывает повышение

износо- и коррозионной стойкости СПП при использовании МАО. На основании проведенных исследований разработана технология ГФУЛ 202001.00.00.000 МАО шарового пальца автомобиля МАЗ, что повысило производительность обработки на 20 %.

Заключение. 1. В результате компьютерного моделирования топографии МП в рабочем зазоре при МАО СПП получена двумерная графическая модель с отображением величины градиента магнитной индукции, позволяющая выявить градиентные зоны концентрации магнитной индукции. Экспериментально подтверждено увеличение режущей способности ФАП, 60–75 % вытесняемого ФАЗ металла переходит в микростружку, что вызвано действием теплового эффекта, возникающего от индукционных токов в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала.

2. Предложены новые составы СОТС, повышающие производительность МАО СПП в 1,5–2 раза и уменьшающие шероховатость обрабатываемой поверхности в 2,5–3 раза.

3. Установлен синергический эффект взаимного влияния параметров градиента магнитной индукции, магнитной проницаемости ФАП и свойств СОЖ при МАО СПП и определен его вклад в обеспечение шероховатости обработанной поверхности (R_a , мкм) – 46,8 % и для производительности (ΔG , мг/(см²·мин) – 45,9 % и приведено физическое толкование полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радзевич, С. П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С. П. Радзевич. – Киев : Вища школа, 1991. – 192 с.

2. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.

3. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.

4. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.

5. Энциклопедия машиностроения. Т. III. Технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский [и др.]. – Машиностроение, 2000. – Т. 3. – 420 с.

6. Маляренко, А. Д. Технологические основы управляемого формообразования / А. Д. Маляренко, И. П. Филонов. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ БГПА, 1999. – 212 с.

7. Безъязычный, В. Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении / В. Ф. Безъязычный [и др.] ; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2007. – 538 с.

8. Акулович, Л. М. Влияние свойств рабочей технологической среды на шероховатость поверхности и производительность при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, М. М. Дечко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67. – № 1. – С. 39–48.

9. Милых, В. И. Автоматизированное формирование расчетных моделей турбогенераторов для программной среды FEMM / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 7–14.

10. Акулович, Л. М. Микрорезание абразивными зёрнами при магнитно-абразивной обработке / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 3. – С. 49–59.

Поступила 20.11.2023