

ВЫВОД

Выполненные исследования позволили установить закономерности и механизмы формирования карбида кремния в покрытии и композиционном материале. Установлено, что в нанопокрывании, представляющем собой активную смесь атомов и кластеров кремния и углерода, реакция взаимодействия компонентов протекает при низких температурах в твердой фазе. Использование вакуумной технологии нанесения и термообработки плазмой тлеющего разряда приводит к образованию α -SiC в нанопокрывании. Перспективным методом получения нанопокрывания из α -SiC с повышенными свойствами является ее раздельный синтез путем создания бездефектной структуры смеси кремния и углерода с последующим переводом в вакууме в тугоплавкое соединение при обработке плазмой тлеющего разряда. При этом этапы синтеза можно проводить на оптимальных режимах. Синтез SiC при получении сверхтвердого материала «алмаз – карбид кремния», протекающий при спекании в присутствии жидкой фазы кремния, приводит к образованию β -SiC. Уровень свойств полученного материала соответствует сверхтвердому материалу «Скелетон D» по верхней границе значений. Формирование в зоне соединения наноструктурного слоя α -SiC обеспечивает высоко-

кую адгезионную прочность. Сформированная структура композита «алмаз – карбид кремния» позволяет повысить вязкость разрушения материала с 5,7 до 10 МПа/м^{0,5}.

Развитие нанотехнологии привело к созданию наноструктурной керамики, управление строением которой осуществляется на кластерном уровне. Эти технологии могут найти применение при создании сверхтвердых материалов на основе алмаза и карбида кремния, материалов с высокой вязкостью разрушения, высокими износостойкостью и теплопроводностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гордеев, С. К.** Алмазные композиционные конструкционные материалы / С. К. Гордеев // Теория и практики технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: труды междунар. конф., Москва, 27–30 авг. 2003 г. – М.: Знание, 2004. – С. 37–41.
2. **Ковалевский, В. Н.** Исследование эмиссионных процессов в плазме тлеющего разряда и их адаптация к магнетронным распылительным системам / В. Н. Ковалевский, К. Б. Фигурин, Б. Л. Фигурин // *Металлургия*. – Минск: Вышэйш. шк., 2002. – Вып. 26. – С. 87–91.
3. **Структурообразование** карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния / В. Н. Ковалевский [и др.] // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2005. – № 5. – С. 8–14.

Поступила 10.10.2006

УДК 621.9.048.4.06

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В., асп. НЕРОДА М. В.

*Белорусский национальный технический университет,
Барановичский государственный университет*

Процесс газотермического нанесения покрытий на рабочие поверхности деталей машин позволяет создавать в зависимости от материалов и технологии металлизации слои с опреде-

ленными свойствами, в результате чего повышаются износостойкость, стойкость к коррозии, эрозии, кавитации и другие эксплуатационные свойства деталей машин, но

специфические свойства покрытий, заключающиеся в хрупкости нанесенного слоя, недостаточной прочности его сцепления с металлом заготовки, высокой твердости, затрудняют последующую механическую обработку [1, 2].

Исследовался процесс магнитно-электрического шлифования (МЭШ) поверхностей, упрочненных сормайтотом ГН1 и газотермическим покрытием из порошкового материала ПГ-СР4. Магнитно-электрическое шлифование является способом комбинированной обработки токопроводящих материалов, сочетающим процессы абразивного микрорезания с электроэрозионным воздействием технологического тока и магнитного поля [3]. Физическая сущность МЭШ заключается в механическом контакте абразивного токопроводящего инструмента с поверхностью детали, замыкании электродов (инструмент – деталь) продуктами шлифования по локальным пятнам контакта, расплавлении контактных мостиков теплотой электротоков и образовании разрядов с последующими электроэрозионными явлениями, происходящими под действием внешнего магнитного поля [4, 5]. Сочетание этих процессов определяет специфику формирования микрогеометрии поверхности при МЭШ.

Для МЭШ упрочненных поверхностей деталей была создана специальная установка на базе фрезерного станка НГФ-100. Обработку поверхностей образцов производили в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Токопроводящий абразивный круг 7 через скользящий контакт 6 и обрабатываемый образец 4 подсоединялись соответственно к отрицательному и положительному полюсам выпрямителя 3. Магнитное поле создавалось с помощью индуктивных катушек 5, электромагнита 2 и магнитопровода 8. Регулирование силы тока в цепи и магнитной индукции производилось ЛАТРАми 1 и 9.

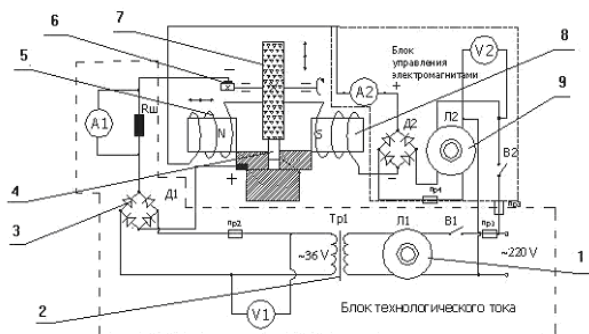


Рис. 1. Принципиальная схема магнитно-электрического шлифования

В качестве исследуемых параметров процесса МЭШ были приняты: шероховатость поверхности $Ra(Y_1)$ (мкм) после обработки и съем материала $Q(Y_2)$ ($\text{мм}^3/\text{мин}$) покрытия. Переменными являлись следующие факторы: технологический ток I (А), величина магнитной индукции B (Тл), скорость резания v ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$), глубина шлифования H (мм), продольная подача S ($\text{мм}\cdot\text{с}^{-1}$).

Условия опытов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Переменные факторы и их уровни

Уровень фактора	$I, \text{А}$	$B, \text{Тл}$	$v, \text{м}\cdot\text{с}^{-1}$	$H, \text{мм}$	$S, \text{мм}\cdot\text{с}^{-1}$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
$-\alpha$	2,48	0,20	2,52	0,12	8,41
-1	8	0,14	8,3	0,4	10
0	12	0,24	12,5	0,6	13,33
+1	16	0,34	16,5	0,8	16,67
$+\alpha$	21,51	0,47	22,48	1,08	16,67

Для описания искомой зависимости МЭШ использовались комплексы различных порядков. Комплекс порядка α равен

$$K_\alpha = \frac{IBH}{S} \left(\frac{v}{S} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где α – произвольное число.

Комплекс порядка 0 и -1 имеет соответственно вид:

$$K_0 = \frac{IBH}{S}; \quad K_{-1} = \frac{IBH}{v}. \quad (2)$$

На основе комплексов различных порядков строились модели вида

$$Y = a_0 + a_1K_0 + a_2K_{-1} + \dots + a_{i-1}K_{i-1}. \quad (3)$$

Расчет коэффициентов уравнений регрессии функции отклика и их статистический анализ производили с помощью программы Microsoft EXCEL на ЭВМ. Значимость коэффициентов регрессии проверялась по критерию Стьюдента, а адекватность уравнения регрессии – по критерию Фишера.

Влияние технологических факторов МЭШ на производительность Q процесса, а также оптимизацию режима производили по полученной математической модели

$$Y_2 = Q = 360 + 95IB - 23S/IB + 11,5IB/S^2vH^3 - 31,3HS + 5I^2B^2/H^2S^3. \quad (4)$$

Зависимость «производительность – технологический ток – магнитная индукция» представлена на рис. 2.

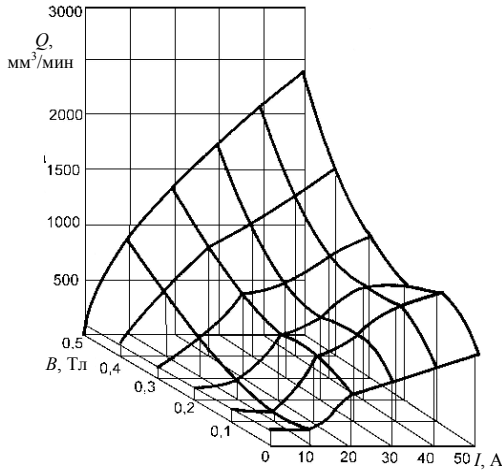


Рис. 2. Зависимость производительности МЭШ поверхностей, наплавленных сормайтот ГН1, от силы тока и магнитной индукции: $v = 12,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; $H = 0,3 \text{ мм}$; $S = 13,3 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$

Из графика видно, что основное влияние на производительность оказывают электрофизические параметры, степень влияния факторов на производительность $Q \Rightarrow I \Rightarrow B \Rightarrow v \Rightarrow S \Rightarrow H$, в порядке убывания.

При постоянной магнитной индукции 0,2 Тл с увеличением технологического тока от 10 до 40 А производительность растет вследствие реализации больших мощностей в межэлектродном промежутке. Обычно наблюдается линейная зависимость производительности от технологического тока.

С повышением магнитной индукции от 0,05 до 0,4 Тл при постоянном технологическом токе в зоне шлифования происходит ускорение выброса продуктов эрозии, микрорасплава и стружки направленным магнитным полем. В этом случае значительная часть энергии расходуется на плавление микровыступов поверхности детали, а не на плавление стружки и продуктов эрозии, что увеличивает производительность шлифования. Пространственная диаграмма зависимостей «производительность – технологический ток – магнитная индукция» имеет максимум производительности $Q = 2500 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Шероховатость обрабатываемых поверхностей покрытий в зависимости от

технологических режимов составила $Ra = 1,1-0,35 \text{ мкм}$.

При уменьшении подачи S увеличивается влияние технологического тока на обрабатываемую поверхность, что приводит к увеличению производительности. Глубина резания H должна находиться в пределах 0,05–0,2 мм, чтобы не удалить упрочненный слой.

Математическая модель шероховатости от технологических режимов МЭШ имеет вид:

$$Y_1 = Ra = 0,474 + 0,206I^2Bv - 0,307IB/vH + 0,16I^3/vS + 0,066BS^{0,5}/H^{0,5}. \quad (5)$$

На рис. 3 представлена зависимость шероховатостей от электрофизических и кинематических параметров.

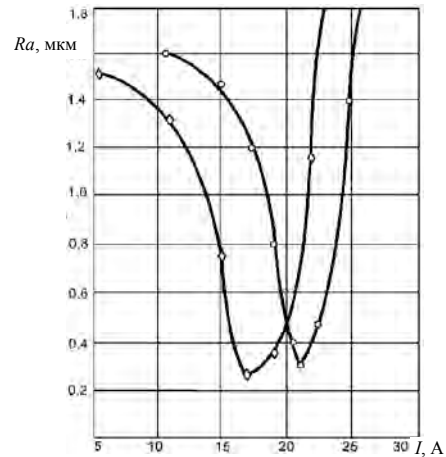


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхностей, наплавленных сормайтот ГН1, от электрофизических и кинематических параметров: $v = 12,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; $B = 0,11-0,51 \text{ Тл}$; $H = 0,3 \text{ мм}$; $S = 13,3 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$

При больших скоростях МЭШ уменьшается действие силы технологического тока в связи с уменьшением максимальной и средней толщины среза, снимаемым одним шлифующим зерном. Происходит также срыв пятна контакта при направленном взаимодействии магнитной индукции и окружной скорости. Средняя мощность технологического тока в зоне контактного взаимодействия становится меньше. Расплавляется только часть приподнятых над основным металлом стружек и возвышенностей. При малых скоростях ($v = 3-5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) ток успевает разрушить стружку, а магнитное поле пытается сгладить расплавленные гребешки выступов микронеровностей. В этом случае шеро-

ховатость снижается по сравнению с обычным шлифованием.

Анализ результатов эксперимента показывает, что с повышением скорости шлифования и магнитной индукции шероховатость увеличивается, но с определенного значения. На рис. 3 явно видна экстремальная точка шероховатости $Ra = 0,3$ мкм для магнитной индукции 0,15 Тл. Взаимодействие технологического тока и магнитного поля происходит следующим образом: с увеличением силы тока до 21 А зависимость шероховатости от магнитной индукции и скорости шлифования изменяется. Оказывая влияние на разряд в зоне шлифования, магнитное поле в этом диапазоне увеличивает проплавляющую способность тока и локализует его в узкой области. В результате все микронеровности оплавляются и расплав под действием внешнего магнитного поля растекается по поверхности детали, уменьшая шероховатость.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы технологические режимы МЭШ (сила тока, магнитная индукция, окружная скорость, толщина снимаемого слоя, величина подачи) и их взаимодействие в процессе шлифования.

2. МЭШ повышает производительность обработки по сравнению с обработкой традиционным шлифованием абразивными кругами.

3. На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость производительности и шеро-

ховатости поверхности от основных параметров МЭШ.

4. Установлено влияние электрофизических параметров на производительность процесса МЭШ при следующих режимах обработки: $I = 20-38$ А; $B = 0,2-0,35$ Тл; $v = 12,5$ м·с⁻¹; $H = 0,05-0,3$ мм; $S = 13,3-15,5$ мм·с⁻¹. Установлено влияние электрофизических параметров на шероховатость поверхности при МЭШ при следующих режимах: $I = 10-15$ А; $B = 0,2-0,3$ Тл; $v = 12,5$ м·с⁻¹; $H = 0,05-0,2$ мм; $S = 13,3-15,5$ мм·с⁻¹.

5. Технология МЭШ является одним из перспективных способов шлифования износостойких газотермических покрытий и упрочненных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудинов, В. В.** Нанесение покрытий напылением: теория, технология и оборудование: учеб. для вузов / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М.: Metallurgy, 1992. – 432 с.
2. **Кожуро, Л. М.** Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов; под ред. Н. Н. Подлекарева. – Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. **Абразивная** и алмазная обработка материалов: справ.; под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
4. **Алмазно-абразивная** обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.
5. **Дмитриченко, Э. И.** Влияние напряженности магнитного поля в зоне обработки на механизм разрушения стружки при МЭШ / Э. И. Дмитриченко // Тез. докл. 6-й НТК ГПИ. – Гомель, 1992. – 28 с.

Поступила 6.06.2006

УДК 621.793.184

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ

Канд. физ.-мат. наук АГЕЕВ В. А., докт. техн. наук ВЕРШИНА А. К.

Белорусский государственный технологический университет

Воспроизведение цвета с регламентированными характеристиками является одной из основных задач при формировании защитных покрытий декоративного назначения. Ее решение включает этап проектирования структурно-компонентной композиции с оптическими ха-

рактеристиками, позволяющими воспроизвести желаемый цвет, который может быть задан как координатами цвета или цветности в одной из колориметрических систем, так и спектральным коэффициентом отражения. На этом этапе, в первую очередь, необходимо убедиться в том,