

УДК 621.762

В.С. Полищук

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА – ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД В МАШИНОСТРОЕНИИ

Научно-технологический центр «Реактивэлектрон» НАН Украины
83096, г. Донецк, ул. Бакинских комиссаров, 17а

Рассмотрены особенности и эффективность абразивной обработки с использованием магнитного поля и технологические методы получения композиционных магнитно-абразивных порошков с различным химическим и фазовым составом, структурой и формой. Показана целесообразность использования карбидов переходных металлов в качестве абразивной компоненты магнитно-абразивных порошков (МАП).

В последние годы интенсивно развивается метод финишной обработки металлов и сплавов с использованием магнитного поля. Изобретенный в России [1], он быстрыми темпами прогрессирует в Японии, США, ФРГ, Южной Корее и других развитых в техническом отношении странах.

Способность магнитного поля воздействовать на ферромагнитные тела с силой, достаточной для абразивного резания, позволила создать способ абразивной обработки, при котором энергия магнитного поля превращается в механическую работу резания непосредственно в зоне обработки без каких-либо промежуточных механизмов–преобразователей. Такой способ был назван *магнитно-абразивным* (МАО). Он позволяет не только интенсифицировать и автоматизировать весь процесс обработки, но и существенно повышать уровень качества и стойкость обрабатываемых изделий.

МАО имеет ряд преимуществ перед традиционной абразивной обработкой. Так, в частности, использование энергии магнитного поля позволяет мягко управлять сцеплением частиц абразивного порошка между собой и давлением на обрабатываемую поверхность, создает возможность объединения в одном рабочем цикле черновой, чистовой и финишной операций шлифования и полирования [2–7]. Непрерывный контакт абразивного порошка с поверхностью изделия снижает циклические нагрузки на систему и способствует повышению точности геометрических размеров и улучшению формы обрабатываемой поверхности. Отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке способствует самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно сложной конфигурации обрабатываемой поверхности, устраняет вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур, что в ряде случаев принципиально важно для получения высокого качества поверхности. МАО позволяет существенно упрочнять

поверхностный слой материала изделия, что повышает износостойкость и долговечность изделий в 1.5–2 раза [7,8].

Важнейшим элементом в МАО является своеобразный инструмент – композиционный МАП, сочетающий в себе магнитные и абразивные свойства. От уровня этих свойств в значительной степени зависят производительность процесса и качество обрабатываемого изделия. Схемы абразивной обработки в магнитном поле и станок МАО показаны на рис. 1. Первоначально для целей МАО применяли однородные материалы (рис. 2, структура I): чугунную и стальную стружку, некоторые ферритовые материалы и др. Однако их эксплуатационные свойства из-за недостаточной твердости были весьма низкими, и их можно было использовать лишь для обработки мягких цветных металлов и сплавов, дерева и пластмасс.

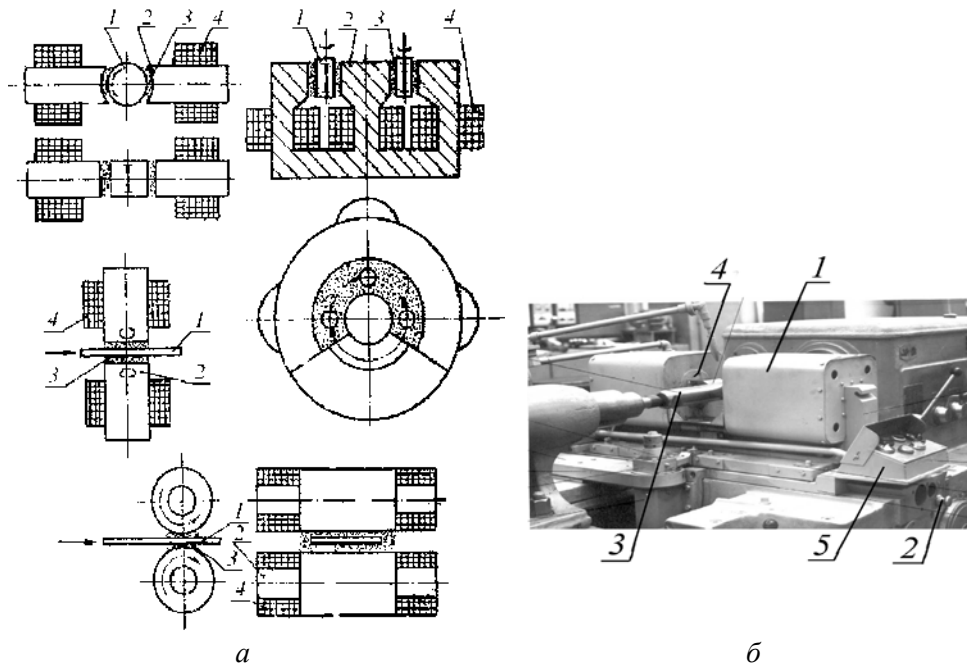


Рис. 1. Схемы (а) абразивной обработки в магнитном поле и станок (б) для ее реализации: а: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – полюсный наконечник, 3 – ферромагнитный абразивный порошок, 4 – электромагнитные катушки; б: 1 – электромагнитные катушки, 2 – каретка, 3 – обрабатываемая деталь, 4 – полюсный наконечник, 5 – пульт управления

Существенным прорывом в этом направлении было создание Ю.М. Бароном (А. с. СССР № 234184) композиционных магнитно-абразивных материалов (КМАМ), состоящих из ферромагнитной основы и твердых немагнитных включений (режущих центров) (рис. 2, структуры II, III). На рис. 2 схематично изображены структуры композиционных МАП, синтезированных различными методами. Темными участками показано расположение абразива в магнитной матрице.

Исследование таких материалов выявило основные закономерности их эксплуатации и несомненные преимущества перед однородными.

Химический и фазовый составы магнитно-абразивного зерна, твердость,

размеры, форма и расположение абразивных частиц в магнитной матрице, уровень физико-химического взаимодействия и прочность связи между компонентами определяют основные эксплуатационные характеристики МАП – их режущую и полирующую способность, стойкость, магнитные свойства. Изменяя указанные параметры, можно в значительных пределах управлять свойствами этих порошков, что открывает широкие возможности в повышении эффективности MAO. В качестве магнитной компоненты МАП оптимальными являются железо и его сплавы с кобальтом, учитывая их удовлетворительные магнитные свойства и невысокую стоимость. Абразивными компонентами МАП могут быть алмаз, карбиды и нитриды кремния и бора, электрокорунд, тугоплавкие соединения переходных металлов и др. Так как все известные классические абразивы являются практически немагнитными, то магнитные свойства композиционного зерна определяются ферромагнитной матрицей.



Рис. 2. Различные структуры зерен МАП

В практике MAO обычно используют композиционные зерна порошков размером 40–500 μm , а абразивную компоненту в магнитной матрице – размером 3–28 μm .

Существует ряд методов синтеза композиционных МАП. Одним из основных является высокотемпературное спекание уплотненных в брикеты исходных порошков абразива и железа или их горячая прокатка. Полученный композит измельчают и классифицируют. Такой метод обеспечивает весьма высокие эксплуатационные характеристики МАП, однако может быть использован лишь в случаях, когда существует определенная совместимость абразивной и магнитной компонент синтезируемого композита.

При выборе компонентов композита необходима оценка конечных равновесных продуктов реакции, учет термостабильных состояний, анализ термодинамических условий химических и фазовых превращений в процессе синтеза для определения оптимальных длительностей контактирования фаз при получении композитных материалов или в условиях эксплуатации.

Так, например, алмаз не устойчив при температуре выше 1200°C, и его спекание с железом при атмосферном давлении затруднено. Карбиды бора и хрома уже при температуре 1200°C и выше активно вступают в химическую реакцию с железом с образованием сложных соединений, имеющих слабые абразивные и магнитные свойства [9,10]. В этих случаях требуются другие методы и приемы синтеза МАП с использованием специальных связок. В некоторых работах [10,12] для MAO применяли смеси алмазных и железных порошков. Такие смеси обладают весьма высокими абразивными свойствами, но в процессе работы они сегрегируют и быстро теряют работоспособность.

В [14–17] при обработке сталей и сплавов была показана перспективность использования в качестве абразивов карбидов переходных металлов. Помимо высокой твердости и хрупкости они обладают теплопроводностью, сравнимой с теплопроводностью обрабатываемых материалов, вследствие чего можно ожидать снижения локализации тепла на границе между абразивным зерном и объектом обработки и в результате – уменьшения вероятности прижогов. Большинство карбидов переходных металлов хорошо смачивается железом, что важно для образования прочной адгезионной связи на границе абразив–магнитная железная матрица. Наличие такой связи исключает необходимость введения дополнительной компоненты – связки, снижающей магнитные свойства.

При твердофазном спекании определяющими являются диффузионные процессы, вязкое и пластическое течение, рекристаллизация, протекающие сравнительно медленно, поэтому требуется довольно большое время для завершения технологического процесса синтеза КМАМ.

При разработке МАП мы применяли жидкофазное спекание, в процессе которого значительно увеличивается скорость диффузии компонентов, облегчается перемещение твердых частиц относительно друг друга. Вследствие этого происходит быстрое заполнение пор и капилляров жидким веществом, что обеспечивает высокие скорости завершения всех технологических процессов, связанных с образованием композита.

Кроме того, осуществление технологического процесса при наличии жидкой фазы может оказать существенное влияние на свойства синтезируемых КМАМ. В частности, обеспечивается контакт частиц абразива с магнитной матрицей практически по всей поверхности твердых частиц, что весьма важно для их прочного закрепления в матрице. Жидкофазное спекание позволяет получать более плотные образцы, что в конечном итоге определяет прочность и работоспособность КМАМ.

Управляя процессом жидкофазного спекания в сочетании с другими факторами (среда, температура и время нагревания), можно в широких пределах менять строение и форму КМАМ, а следовательно, и их свойства.

Образовавшаяся жидкость способствует возникновению сжимающих капиллярных усилий между частицами при определенной степени смачивания частиц жидкостью. Наличие последней не только обуславливает возникновение капиллярного давления, способствующего передвижению частиц, но и значительно облегчает его, так как жидкость, затекая в пространство между частицами, выполняет роль смазки, резко уменьшая трение и заклинивание частиц.

Высокое химическое сродство ряда переходных металлов с углеродом, быстротечность высокотемпературных процессов синтеза с участием жидкой фазы, определенная устойчивость некоторых карбидов (TiC, VC, ZrC, NbC, MoC, WC и др.) в жидком железе позволили разработать метод получения композиционных МАП непосредственно из простых веществ [9,18,19], что обеспечило их низкую стоимость при достаточно высоких эксплуатационных характеристиках (рис. 3).

При совместном нагревании смесей порошков Me + C + Fe в широких концентрационных и температурных интервалах основными конечными про-

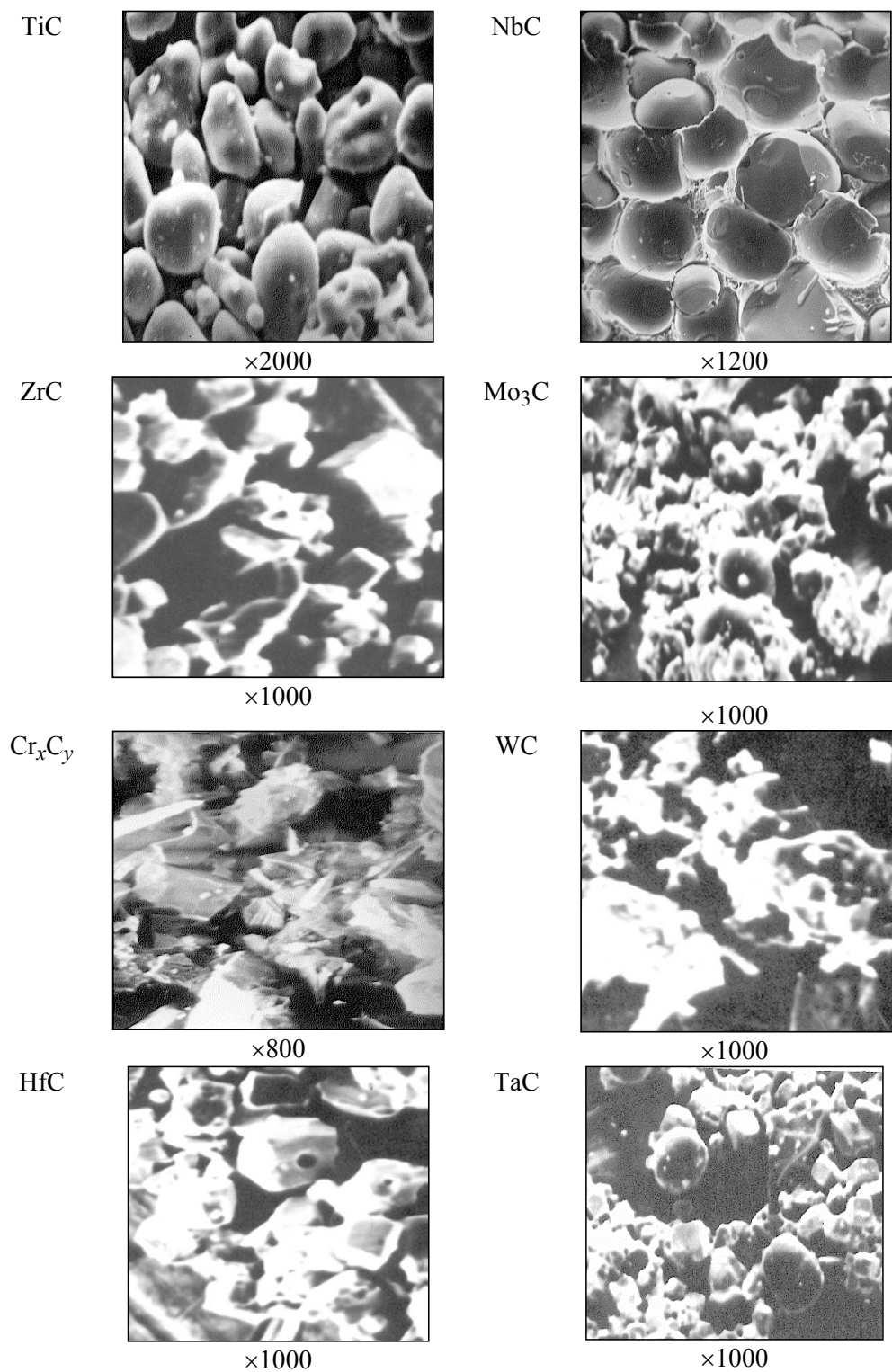


Рис. 3. Кристаллы карбидов переходных металлов, выделенные из железной матрицы КМАМ путем растворения железа в минеральных кислотах

дуктами химического взаимодействия исходных компонентов являются карбиды переходных металлов и α -железо. Таким способом были получены КМAM на основе карбидов Ti, Zr, V, Cr, Hf, Mo, W и железа. Фазовый состав синтезированных КМAM приведен в таблице, а внешний вид кристаллов синтезированных карбидов, выделенных из расплава железа растворением в минеральных кислотах, показан на рис. 3.

Таблица

Фазовый состав КМAM на основе карбидов переходных металлов IV, V и VI групп, синтезированных из простых веществ

Исходные компоненты	Фазовый состав и параметры решетки композитов			Примечания
	MeC	Fe	Другие фазы	
Ti + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 4.329 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.324 \text{ \AA}$	$a_{\text{лит}} = 2.869 \text{ \AA}$ (α -Fe) $a_{\text{эксп}} = 2.869 \text{ \AA}$	Не обнаружены	TiC стехиометричен. Дифракционные линии Fe узкие, параметры соответствуют литературным данным.
Zr + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 4.698 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.681 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.865 \text{ \AA}$		Ионы Fe частично замещают ионы Zr в карбиде ZrC. Дифракционные линии узкие.
Hf + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 4.641 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.634 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.868 \text{ \AA}$		HfC близок к стехиометрии. Некоторое замещение ионов Hf ионами Fe в карбиде.
V + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 4.167 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.166 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.867 \text{ \AA}$	5–7% FeC	VC нестехиометричен. Линии α -Fe размыты.
Nb + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 4.470 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.468 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.866 \text{ \AA}$	Не обнаружены	–
Ta + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 4.455 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.456 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.868 \text{ \AA}$		TaC стехиометричен. Дифракционные линии узкие.
Cr + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 13.890 \text{ \AA}$ $c_{\text{лит}} = 4.523 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 14.024 \text{ \AA}$ $c_{\text{эксп}} = 4.409 \text{ \AA}$	α -Fe отсутствует	(Fe, Cr) + FeCr	Высший карбид хрома Cr ₃ C ₂ отсутствует. Практически отсутствует α -Fe.
Mo + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 3.006 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 2.994 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.867 \text{ \AA}$	5–7% FeMo $a_{\text{лит}} = 4.730 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 4.722 \text{ \AA}$	В композите присутствует 5–7% FeMo. Mo ₂ C нестехиометричен.
W + C + Fe	$a_{\text{лит}} = 2.916 \text{ \AA}$ $c_{\text{лит}} = 2.844 \text{ \AA}$ $a_{\text{эксп}} = 2.907 \text{ \AA}$ $c_{\text{эксп}} = 4.409 \text{ \AA}$	$a_{\text{эксп}} = 2.867 \text{ \AA}$	10% FeW ₃ C	WC нестехиометричен. Дифракционные линии узкие.

Анализ строения зерен КМАМ (форма зерна, распределение абразивных частиц в магнитной матрице, их дисперсность и уровень взаимодействия с железом) и их физических свойств (микротвердость, прочность зерна, магнитная проницаемость, намагниченность насыщения) показывает, что эти характеристики взаимосвязаны и оказывают влияние на работоспособность МАП [7,9,18,19].

TiC-Fe

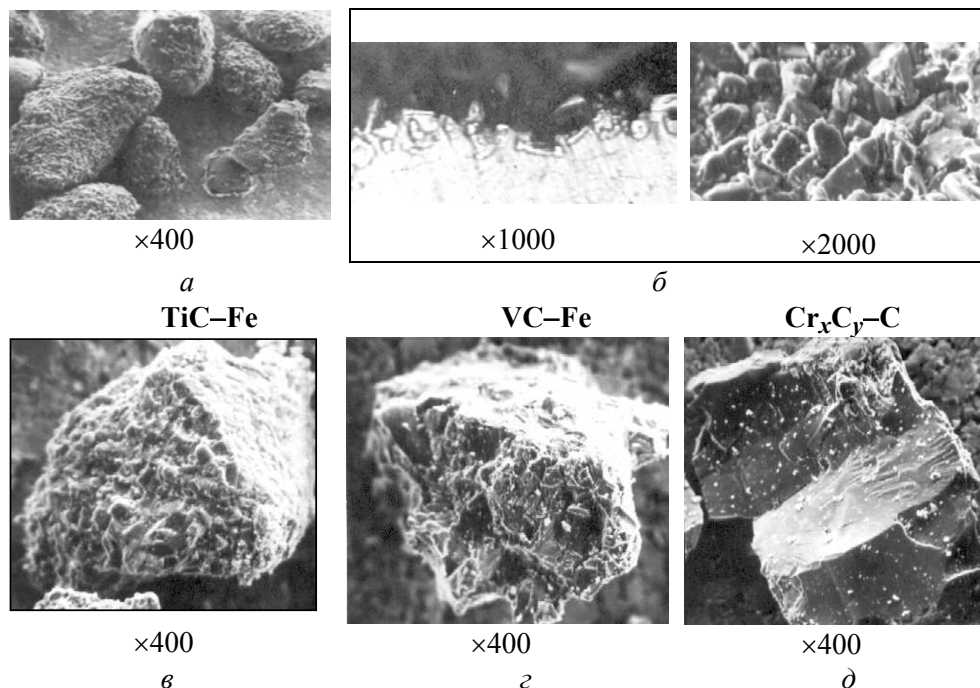


Рис. 4. Внешний вид частиц композиционных МАП с поверхностным (а, б) и объемным (в-д) расположением абразива (растровый электронный микроскоп «Микроскан-5»); а – частицы карбида титана на поверхности железной матрицы, б – контактная зона железная матрица–карбид титана

Хорошо в присутствии железа образуются карбиды металлов IV группы (Ti, Zr, Hf). Они имеют состав, близкий к стехиометрическому, дифракционные линии узкие, параметры решеток соответствуют справочным данным, практически не наблюдается заметного взаимодействия образовавшихся карбидов и железа. Хуже в присутствии железа образуются карбиды металлов V группы, у которых заметны некоторые отклонения от стехиометрического состава; несколько размыты дифракционные рентгеновские линии у α -железа, присутствуют зоны взаимного проникновения (особенно это характерно для VC-Fe). В присутствии железа высшие карбиды хрома вообще не образуются, если в шихте менее 70% карбидообразующих компонентов [9].

Синтез КМАМ непосредственно из простых веществ по схеме $Me + C + Fe \rightarrow MeC + Fe$ существенно упрощает и удешевляет их производство. В таких условиях абразивные центры из карбидов переходных металлов (TiC, VC, NbC, TaC и др.) формируются в железной матрице в виде глобулей с округленными

гранями (рис. 3, TiC, ZrC, NbC, HfC, TaC), что позволяет при MAO достигать минимальных (до 0.01 μm) микронеровностей обрабатываемой поверхности.

На рис. 4 показаны форма и строение композиционных магнитно-абразивных зерен на основе карбидов титана, ванадия и хрома с поверхностным (*a, б*) и объемным (*в-д*) расположением абразива.

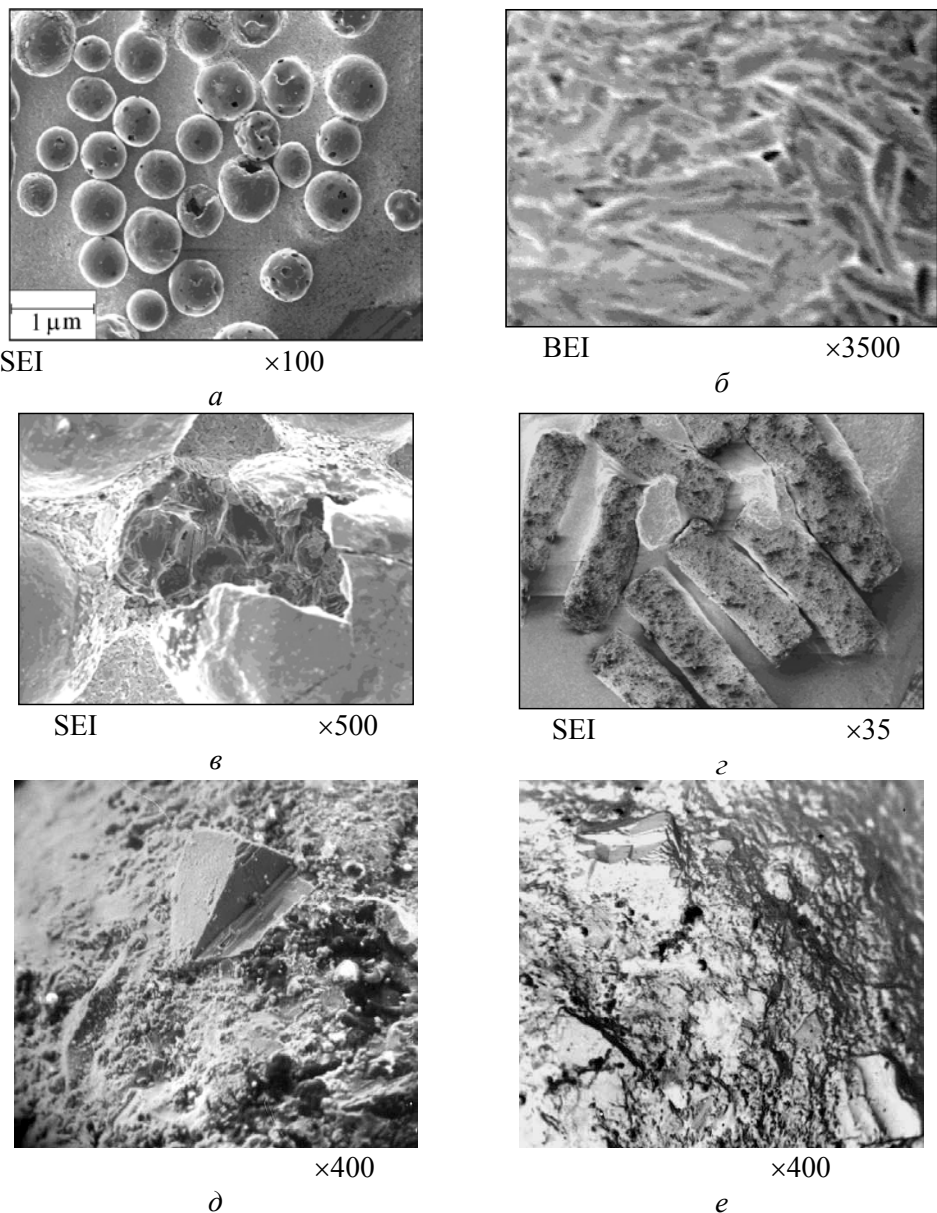


Рис. 5. МАМ состава 50% TiC + 50% Fe, синтезированный из классифицированных порошков карбида титана и железа жидкофазным спеканием: *a-в* – шарообразные МАП (*a* – внешний вид, *б* – поверхность, *в* – излом); *г* – столбчатые МАП; *д, е* – частицы карбида титана на поверхности железной матрицы. SEI – контраст во вторичных электронах, BEI – в отраженных

При измельчении в щековой дробилке или вибромельнице разрушение спеков КМAM, синтезированных с участием жидкой фазы железа, происходит по железной матрице, при этом на поверхности обнажаются грани карбидов (рис. 5, *d, e*), что обеспечивает высокие режущие свойства таких МАП (рис. 6). На рис. 5, *a–в* показан внешний вид частиц МАП, имеющих шарообразную и цилиндрическую форму, которые получены жидкофазным спеканием карбида титана и железа.

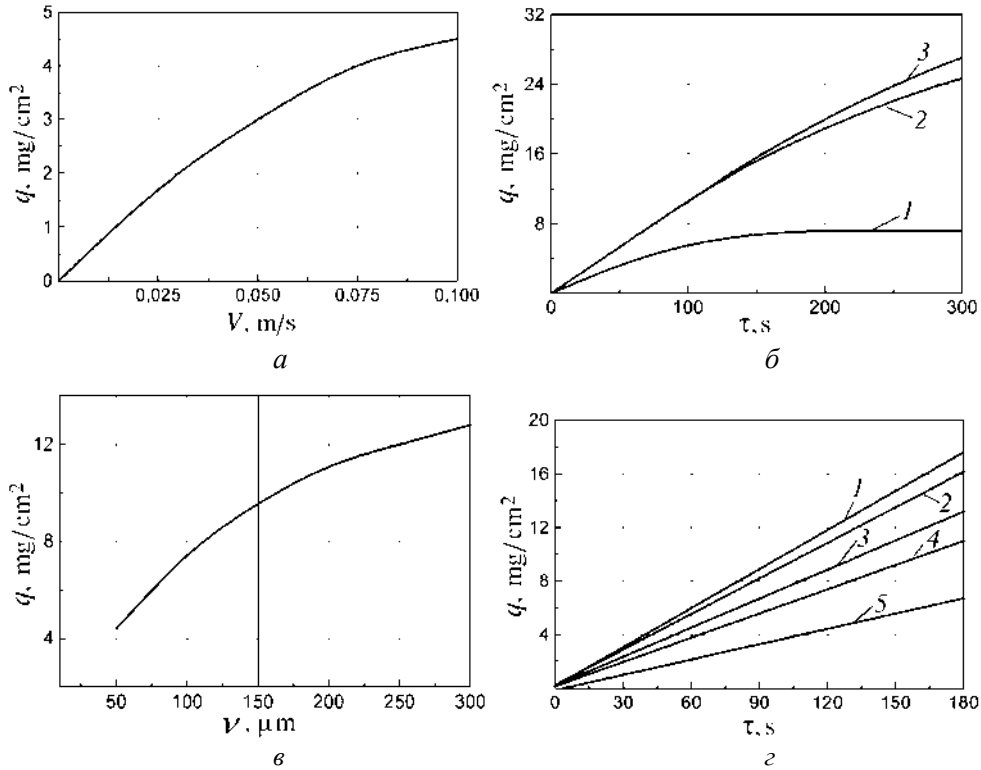


Рис. 6. Эффективность работы КМAM (Fe + 50% TiC), синтезированного из простых веществ: *a* – зависимость удельного съема q от скорости резания V для фракции 180/100; *б* – зависимость удельного съема q от времени τ (стойкость КМAM) для фракций 100/40 (1), 180/100 (2), 315/180 (3); *в* – зависимость удельного съема q от размеров зерен КМAM ν ; *г* – зависимость удельного съема металла от длительности полирования сталей У8 (1, 2, 3), Р6М5 (4) и 12Х18Н10Т (5) с твердостью: 1 – НВ 185–187, 2 – HRC 43–45, 3 – HRC 63–65, 4 – HRC 63–65, 5 – НВ 146–148. Условия испытаний: обрабатываемый материал – сталь У8 (HRC = 35–40); исходная шероховатость поверхности $R_a = 0.4$; длительность обработки $\tau = 120$ s

Особенно эффективен метод жидкофазного синтеза МАП при наличии хорошего смачивания абразивных частиц железом. В этом случае предварительно подготовленные агломераты смеси порошка железа и абразива размерами 40–500 μm на короткое время вводятся в область с температурой, на 50–100°C превышающей температуру плавления железа, а затем закаливаются в вакууме. Вследствие незначительных размеров частицы МАП мгновенно принимают температуру окружающей среды, железная матрица плавится, и

за счет сил поверхностного натяжения синтезируемый композит приобретает форму шара (рис. 5,а,в). Ввиду быстротечности процесса смачивания и растекания такой метод может быть использован для синтеза композиционных порошков с термодинамически нестабильными системами, например V_4C-Fe и Cr_3Cr_2-Fe . Варьируя температурные и временные факторы синтеза МАП, можно обеспечить такие условия, при которых реализуется смачивание абразива магнитной компонентой, а химическое взаимодействие между ними будет ограничено.

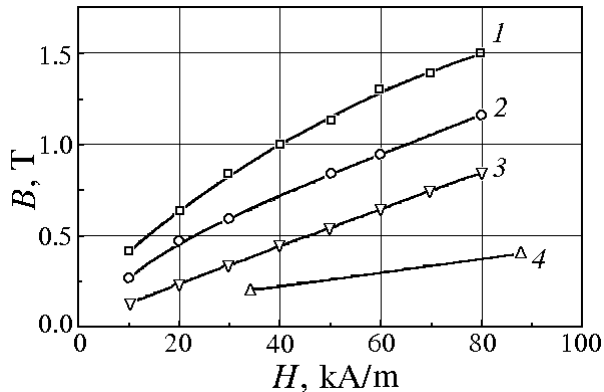


Рис. 7. Кривые намагничивания МАМ: 1 – 50% TiC + Fe; 2 – 50% VC + Fe; 3 – 50% Cr_xC_y + Fe; 4 – КЕРМЕТ 23АМ40 Fe80

ограничено.

Из рис. 6 следует, что эффективность МАО зависит от многих факторов: размера и строения зерна МАП, скорости резания, твердости обрабатываемой детали, длительности процесса. Магнитные свойства МАП, обеспечивающие удержание абразивных частиц в рабочей зоне, определяются их химическим и фазовым составом (рис. 7).

Таким образом, разработанный комплекс технологических методов и приемов позволяет создавать МАП различного химического и фазового состава, строения и формы, что обеспечивает возможность рационального и эффективного их использования в различных схемах МАО как мягких, так и сверхтвердых материалов.

1. Г.С. Шулев, Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, ФТИ АН БССР, Минск (1965).
2. Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев, Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками, Наука и техника, Минск (1967).
3. Н. Zhen-Bing, R. Komanduri, J. Tribology **120**, 660 (1998).
4. П.И. Яцерицын, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович, Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле, Наука и техника, Минск (1988).
5. П.И. Яцерицын, Л.М. Кожуро, А.П. Ракомсин и др., Технологические основы обработки изделий в магнитном поле, ФТИ, Минск (1997).
6. E. Wantuch, H. Zutze, Neue Fertigungstechnologien **5**, 232 (2002).
7. Ю.М. Барон, Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов, Машиностроение, Ленинград (1986).
8. Ю.М. Барон, в сб.: Вопросы судостроения. Сер. Технология и организация производства судового машиностроения, вып. 23, (1980).
9. В.С. Полищук, Г.Д. Наливка, Н.Г. Кисель, Порошковая металлургия № 3, 93 (1983).
10. Р.З. Власюк, В.Б. Деймонтович, А.А. Мамонова, И.Д. Радомысельский, Порошковая металлургия № 10, 26 (1981).
11. Ю.М. Барон, Технология абразивной обработки в магнитном поле, Машиностроение, Ленинград (1975).
12. N.S. Chomich, Beschichten von Metall und Kunststoff **12**, 936 (1995).

13. *Н.Я. Скворчевский*, в кн.: Магнитно-абразивная обработка деталей машин. Тез. докладов БНИИНТИ, Минск (1979), с. 5–7.
14. *Г.В. Самонов, В.В. Стасовская*, Абразивы и алмазы № 15, 5 (1965).
15. *П.С. Кислый, Л.С. Голубяк, О.В. Заверуха*, Порошковая металлургия № 9, 94 (1970).
16. *А.А. Адамовский*, Порошковая металлургия № 5, 49 (1974).
17. *Г.В. Самсонов, А.С. Притуляк, А.Н. Степанчук, А.А. Адамовский*, Вестник Киевского политехнического института. Сер. Машиностроение № 11, 158 (1974).
18. *Г.В. Самсонов, В.С. Полищук, Г.Д. Наливка, Н.И. Гончарова*, Способ получения порошков магнитно-абразивных материалов, А.с. СССР № 693812, 11.10.1976.
19. *Г.Д. Наливка, В.С. Полищук, А.Н. Степанчук*, Порошковая металлургия № 8, 83 (1979).

V.S. Polishchuk

MAGNETICALLY ABRASIVE TREATMENT AS A HIGH-EFFICIENT METHOD IN MACHINE BUILDING

Peculiarities and efficiency of the abrasive treatment in the presence of magnetic field and technological methods for the production of composite magnetically abrasive powders of various chemical and phase composition, structure and form have been considered. Transition-metal carbides are shown to be appropriate abrasive component of magnetically abrasive powders (MAP).

Fig. 1. Schemes of the abrasive treatment in the presence of magnetic field (*a*) and machine tool for its realization (*b*): *a*: 1 – workpiece, 2 – pole piece, 3 – ferromagnetic abrasive powder, 4 – electromagnetic coils; *b*: 1 – electromagnetic coils, 2 – carriage, 3 – workpiece, 4 – pole piece, 5 – control desk

Fig. 2. Various structures of MAP grains

Fig. 3. Crystals of transition-metal carbides segregated from composite magnetically abrasive materials (CMAM) iron matrix by dissolution of iron in mineral acids

Fig. 4. Appearance of composite MAP particles with abrasive located on the surface (*a, b*), in the bulk (*c-d*) (scanning electron microscope «Microscan-5»); *a* – titanium carbide particles on the surface of iron matrix, *b* – zone of iron matrix–titanium carbide contact

Fig. 5. Magnetically abrasive materials (MAM) of 50% TiC + 50% Fe composition synthesized from classified titanium carbide powders and iron by means of liquid-phase sintering: *a-c* – ball-like MAP (*a* – appearance, *b* – surface, *c* – fracture); *d* – pole-like MAPs; *e* – titanium carbide particles on the surface of iron matrix. SEI – secondary electron image, BEI – back-scattered one

Fig. 6. Efficiency of operation of CMAM (Fe + 50% TiC) synthesized from elementary substances: *a* – dependence of specific removal of material *q* on rate of cutting *V* for the 180/100 fraction; *b* – dependence of specific volume *q* on time τ (CMAM stability) for the 100/40 (1), 180/100 (2), 315/180 (3) fractions; *c* – dependence of specific removal of material *q* on CMAM grain size *v*; *d* – dependence of specific removal of metal on duration of У8 (1, 2, 3), P6M5 (4) and 12X18H10T (5) steel polishing. Hardness of steels: 1 – HB 185–187, 2 – HRC 43–45, 3 – HRC 63–65, 4 – HRC 63–65, 5 – HB 146–148.

Testing conditions: the processed material – steel У8 (HRC = 35–40); initial surface roughness $R_a = 0.4$; duration of processing $\tau = 120$ s

Fig. 7. Magnetization curves for MAM: 1 – 50% TiC + Fe; 2 – 50% VC + Fe; 3 – 50% Cr_xC_y + Fe; 4 – CERMET 23AM40 Fe80