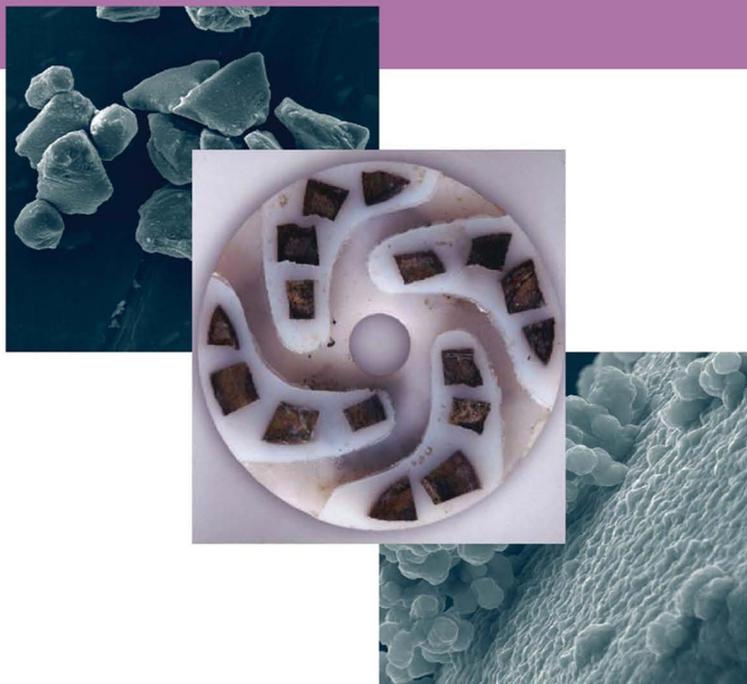




Л. В. Судник
П. А. Витязь
А. Ф. Ильющенко

АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИЕ АБРАЗИВНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ



УДК 621.793:546.26-162

Судник, Л. В. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты / Л. В. Судник, П. А. Витязь, А. Ф. Ильюшенко. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 319 с. – ISBN 978-985-08-1425-8.

Работа посвящена разработке новых алмазосодержащих композиционных материалов (АКМ) и технологий получения изделий на их основе с требуемыми эксплуатационными параметрами, обеспечивающими высокопроизводительную абразивную обработку деталей на основе металлических (закаленных сталей, твердых сплавов) и неметаллических материалов (стекло, керамика, природный камень, пластмасса). Представлены научные и практические результаты в области создания АКМ, использование которых способствует решению крупной народнохозяйственной проблемы – созданию эффективного высокопроизводительного абразивного инструмента, а также абразивных материалов (суспензий, паст) нового поколения.

Рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области керамики: производственников, проектировщиков, научных работников, материаловедов и потребителей абразивных материалов и инструментов. Может быть полезна преподавателям и студентам высших учебных заведений, специализирующихся в области порошковой металлургии, материаловедения, нанокompозитов и керамики.

Табл. 63. Ил. 150. Библиогр.: 254 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук, профессор В. Н. Ковалевский,
кандидат технических наук, доцент А. А. Бойко

ISBN 978-985-08-1425-8

© Судник Л. В., Витязь П. А.,
Ильюшенко А. Ф., 2012
© Оформление. РУП «Издательский
дом «Беларуская навука», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация машиностроительного оборудования, увеличение скоростей обработки и расширение номенклатуры обрабатываемых материалов обусловили необходимость разработки эффективных абразивных материалов, сохраняющих способность работы в экстремальных условиях. Инструмент из алмазо-содержащих композиционных материалов (АКМ) в силу рекордной твердости алмазов нельзя заменить никакими другими материалами при обработке изделий из сверхтвердых материалов, стекла, керамики, природных и синтетических материалов. Ежегодно только для металлообработки Республика Беларусь импортирует алмазно-абразивный инструмент на сумму до 7 млн долларов США, поэтому решаемая проблема создания нового инструмента является экономически актуальной.

В настоящее время для изготовления инструмента из АКМ применяют три группы связок: органические, металлические и керамические. Инструмент из АКМ на органических и металлических связках, обладая относительной простотой технологического исполнения, при интенсификации режимов резания обнаруживает целый ряд недостатков: низкое алмазоудержание, отсутствие самозатачиваемости, низкую механическую прочность, засаливание поверхности инструмента и обрабатываемых деталей, что существенно снижает производительность и качество абразивной обработки.

Перспективным направлением в создании инструмента является использование АКМ на керамической связке, которая позволяет осуществлять процесс абразивной обработки в режиме

самозатачивания, т. е. вскрытия новых алмазных зерен по мере потери режущих свойств уже участвующих в работе, обеспечивает высокую адгезию алмазных зерен в связке. Керамическая связка выдерживает более высокие температуры при абразивной обработке, обладает сама высокой твердостью и невысоким коэффициентом трения с обрабатываемым материалом, что обеспечивает более высокую производительность обработки, нежели при использовании инструмента на органической и металлической связках. Выбор керамических связок для АКМ отражает общую тенденцию в развитии алмазосодержащих композиционных материалов (процентное отношение АКМ на керамических связках к другим в 1990 г. составило 10%, в 2000 г. – 30%, а в 2011 г. 50% всего шлифовально-абразивного инструмента в мире стали выпускать на керамических связках).

С 80-х годов XX в. во многих странах были начаты исследования по разработке связок на основе стеклокерамики, при этом наибольшее распространение получили алмазосодержащие материалы со связкой на основе стекол следующих систем: $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{PbO}-\text{SiO}_2$, созданные под руководством академиков Г. В. Самонова, И. Н. Францевича, Н. В. Новикова, П. С. Кислого.

Однако темпы промышленного внедрения АКМ на стеклокерамических связках сдерживаются относительно невысоким ресурсом работы инструмента в условиях воздействия вибрационных нагрузок, низкой трещиностойкостью керамики, высокими температурами спекания, при которых часть алмазных зерен выгорает, малой адгезией керамической связки к алмазным зернам, ведущей к потере размерности рабочего слоя и быстрому износу инструмента. Таким образом, актуальными техническими задачами является упрочнение и повышение теплостойкости алмазных зерен, понижение технологических температур, повышение прочности связи между алмазными зернами и связкой.

На сегодняшний день установлено, что в условиях абразивной обработки более высокие эксплуатационные параметры имеет инструмент с пористой матрицей и определенным уровнем удержания алмазных зерен с керамическими наноразмерными по-

крытиями, в котором введение наноразмерных частиц в матрицу определенного состава должно обеспечить требуемую твердость, прочность, близкий к алмазному коэффициент линейного термического разрушения, пониженную температуру спекания, а пористость будет способствовать повышению трещиностойкости. Поэтому в приведенной работе установлена связь между составом и пористостью связки, количеством и распределением алмазных зерен в рабочем слое, составом и геометрией наноразмерных компонентов и уровнем межкомпонентного взаимодействия, прочностными свойствами в диапазоне рабочих нагрузок. Определен оптимальный состав и структура АКМ, при которых в процессе абразивной обработки происходит снижение скорости и остановка развития трещин, достигается требуемый уровень абразивных свойств, снижается износ рабочей поверхности, что, в свою очередь, должно обеспечивать повышение ресурса работы АКМ.

В связи с отсутствием требуемого объема научной информации проведение комплексных исследований, направленных на выявление зависимости эксплуатационных параметров инструмента от физико-механических свойств и структуры АКМ, разработку теоретических основ проектирования структуры композита с наноразмерными компонентами и технологических процессов получения абразивных материалов и инструмента на их основе, освоение их производства является актуальной научной и практической задачей, ориентированной на решение важной народно-хозяйственной проблемы.

Методология работы определена гипотезой, для подтверждения которой решен ряд взаимосвязанных теоретических и технологических задач, направленных на выявление закономерностей развития трещин в пористых АКМ с нанокomпонентами в виде включений в матрице (связке) и керамических покрытий на алмазных зернах, формирования рабочего слоя инструмента, требуемого уровня взаимодействия между компонентами, а также установление связи между эксплуатационными параметрами и технологическими режимами изготовления АКМ и инструмента на его основе.

Теоретические исследования выполнены с применением системного анализа и математического моделирования процесса эксплуатации, позволяющего выявить условия распространения усталостных трещин; метода конечных элементов для исследования напряженно-деформированного состояния рабочего слоя инструмента из АКМ; определения значимых факторов абразивной обработки; оптимизации составов, структуры и технологии изготовления АКМ и инструмента. Использованы современные технические средства и методы исследования структуры и свойств материалов: рентгеноструктурный анализ (ДРОН), дифференциальный термический и термографический анализы (дериватограф Q-1500), ИК спектроскопия, оптическая, электронная и атомно-силовая микроскопия («Нанотоп-2005»). Достоверность результатов обеспечивалась использованием методов математической статистики, воспроизводимостью полученных теоретических и экспериментальных данных измерений твердости и микротвердости, исследованиями шероховатости, физических, механических, реологических свойств, а также подтверждается успешной реализацией разработанных материалов в промышленности.

Авторы выражают огромную благодарность коллективам лабораторий ГГТУ им. П. О. Сухого (г. Гомель), ГГУ им. Ф. Скорины (г. Гомель), лично И. М. Мельниченко, А. А. Бойко, Е. Н. Подденежному, М. П. Купрееву, В. Е. Гайшуну, И. В. Бонадысеву, научно-исследовательскому центру ГНУ ИПМ (г. Минск), лично Л. В. Марковой, Т. И. Пинчук, без помощи которых как в теоретической части, касающейся описания свойств золь-гельных композиций, так и в практической реализации исследований, а именно разработке и внедрении технологий и изделий из АКМ книга была бы неполной.

Считаем своим долгом выразить признательность А. А. Дешковской за проведенные исследования по термолизу оксидноциркониевых покрытий. Благодарим Е. В. Жук за помощь, оказанную в подготовке рукописи.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (АКМ) ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

1.1. Проблемы создания инструмента из АКМ с требуемым комплексом эксплуатационных параметров

Алмазосодержащая керамика является композиционным материалом и отражает общую тенденцию в совершенствовании и создании новых материалов. Ни алмаз, ни корунд или карбид кремния, ни стекло не могут выполнять своей функции в АКМ независимо, поэтому они рассматриваются как единая композиция, отличающаяся количественно и качественно от свойств компонентов, составляющих алмазосодержащий керамический композит. Вместе с тем основные компоненты сохраняют свои индивидуальные признаки в материале.

В целом свойства АКМ определяются составом, геометрией и объемным содержанием компонентов, расположением компонентов (макроструктурой), прочностью связи между абразивными зёрнами и матрицей [1–17].

Анализ литературных данных и многолетние исследования авторов, направленные на выявление взаимосвязи между структурой, составом компонентов, физико-механическими и химическими свойствами компонентов, технологией получения композитов, изделий из них и характеристиками процесса эксплуатации, позволили разработать методологию создания АКМ нового поколения, которая заключается в следующем:

изучение условий эксплуатации АКМ в процессе абразивной обработки и установление математических зависимостей параметров эксплуатации от структурных параметров АКМ (пористость, содержание компонентов, гранулометрический, элементный и фазовый состав и т. п.);

выбор критериев работоспособности АКМ и расчет оптимального комплекса структурных характеристик;

разработка моделей внутренней структуры АКМ и структуры рабочего слоя инструмента из АКМ; определение составов, способствующих обеспечению запланированных эксплуатационных параметров;

выбор технологии производства АКМ, оптимизация технологических параметров, обеспечивающих получение АКМ и инструмента на его основе требуемого состава и комплекса структурных параметров.

1.1.1. Влияние компонентов АКМ на внутреннюю структуру и свойства

Характеристика компонентов АКМ. Отличительной особенностью АКМ является высокая твердость его абразивных зерен. Оценку твердости на производстве чаще производят с помощью сравнительной твердости (шкала Мооса). Наиболее высокое положение по этой шкале занимает алмаз как самый твердый в природе минерал, твердость его оценивается цифрой 10. Наиболее низкой твердостью с оценкой 1 обладает тальк.

Для сравнения различных абразивных зерен введена еще одна характеристика – абразивная способность, которая выражается как отношение массы сошлифованного материала к массе навески абразивного материала (зерна). Абразивную способность определяют при шлифовании стеклянных дисков свободно насыпанным абразивным зерном измерением количества сошлифованного стекла [18–20, 32]. Можно утверждать, что абразивная способность характеризует режущую способность материала в целом, хотя на практике она является условным показателем, прежде всего потому, что исследователи часто представляют данные, полученные при обработке разнородных материалов. На эксплуатационные параметры (полировальные и шлифовальные свойства) АКМ влияют твердость и пористость матрицы. Поры создают условия для снятия стружки и ее размещения в момент нахождения абразивного зерна в контакте с обрабаты-

ваемым материалом. Введение пор в структуру матрицы неизбежно приводит к снижению прочности. В связи с этим появляется задача повышения прочности матрицы. Метод, предложенный авторами для компенсации потери прочности от введения пор, состоит в упрочнении матрицы путем введения модифицирующих наноразмерных частиц. Проблемой является также определение оптимального сочетания пористости и твердости для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик, сочетание пористости и твердости. При этом пористая структура для АКМ на стеклосвязках обеспечивается либо введением в исходную шихту компонентов, способных к газообразованию, за счет химических реакций, либо за счет введения выгорающих добавок [33].

Увеличение прочности абразивного инструмента достигается совершенствованием технологических процессов создания инструмента, разработкой новых связок повышенной прочности и специальной конструкции кругов [14]. Из АКМ изготавливают инструменты в виде абразивных кругов, вставок, брусков, сегментов, которые могут быть применены при шлифовании и доводке деталей из труднообрабатываемых материалов: стекла, керамики, пластмассы, быстрорежущих сталей, нержавеющей хромистых сталей мартенситного типа и других материалов.

Компоненты АКМ могут быть из природных и синтетических материалов. К природным материалам относятся корунд, гранит, кварц, кремнь, известняк, тальк. Синтетические компоненты АКМ отличаются более высокими и стабильными свойствами.

Свойства синтетических абразивных материалов, используемых при разработке АКМ, приведены в табл. 1.1 [15, 26].

Структура и свойства алмазных зерен. Алмазные зерна для АКМ – это синтетический порошок, представляющий совокупность кристаллов и поликристаллов размером до 3000 мкм.

Впервые надежные результаты синтеза алмазов были получены в 50-е годы XX в. в США и Швеции. Тогда удалось искусственным образом создать условия, при которых графит переходит в кристаллы алмаза. С тех пор индустрия синтетических

Таблица 1.1. Свойства синтетических материалов [5]

Свойства	1	2	3	4
	Алмазные зерна	Эльбор	Карбид кремния	Белый электрокорунд
Плотность, г/см ³	3,48–3,54	3,45–3,54	3,16–3,39	3,93–4,16
Твердость по Моосу	10	9,8	9,2	9
Микротвердость Н _ц , ГПа	98	71,5	34	26
Предел прочности при изгибе, Па	294	–	15,2	78–89
Предел прочности при сжатии, Па	1960	–	1960	720
Модуль упругости, МПа	882	–	457	45,7–60
Теплостойкость, °С	700–900	1400–1800	1200–1300	1500–1700
ТКЛР, α, 10 ⁻⁶ /°С (20 °С)	0,9–1,45	2,1–2,3	5–7	7,5
Температура плавления (разложения), °С	3700–4000	3000	2600	1850–2050
Удельное электрическое сопротивление, Ом · см	3 · 10 ¹³ –5 · 10 ¹⁴	2 · 10 ¹² –1 · 10 ¹²	3 · 10 ⁵ –3 · 10 ⁷	10 ¹⁴ –10 ¹⁶
Абразивная способность	0,75–0,77	0,58–0,64	0,25–0,45	0,14–0,16

алмазов является одним из самых быстрорастущих сегментов мировой промышленности. Искусственно синтезированные алмазы получили широкое применение в различных отраслях мировой промышленности, так как только 10% алмазов, используемых для промышленных целей, являются натуральными. В 1970 г. было произведено около 40 млн карат синтетических алмазов, а 2003 г. мировой объем производства составил более 2 млрд карат. На рис. 1.1 представлены данные о динамике мирового производства синтетических алмазов, сформированные на основе различных источников [2, 3].

Мировое производство синтетических алмазов, по данным U. S. Geological Survey, сконцентрировано в 15 странах мира. При этом около 56% мирового производства приходится на Китай. Среди прочих стран мира наибольшими мощностями по производству синтетических алмазов обладают ЮАР и США, на долю которых приходится более 65% оставшегося производства (рис. 1.2).

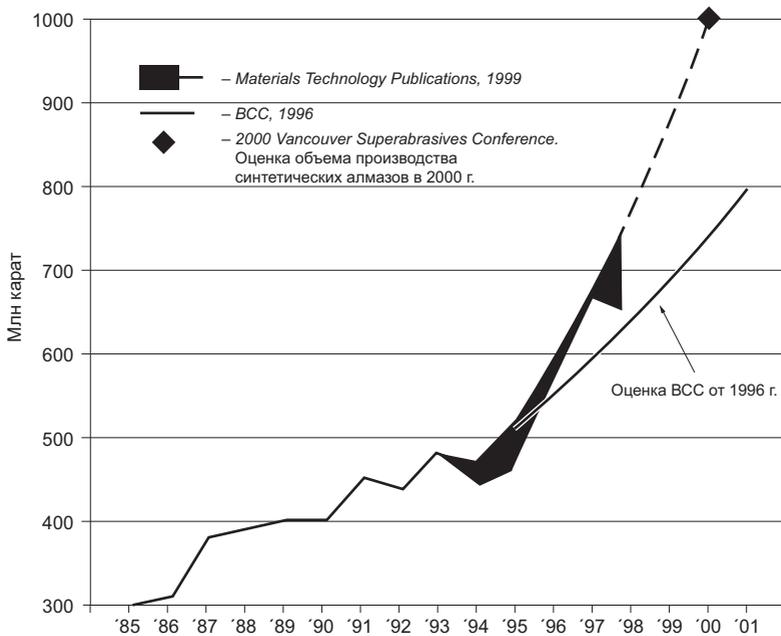


Рис. 1.1. Мировое производство синтетических алмазов

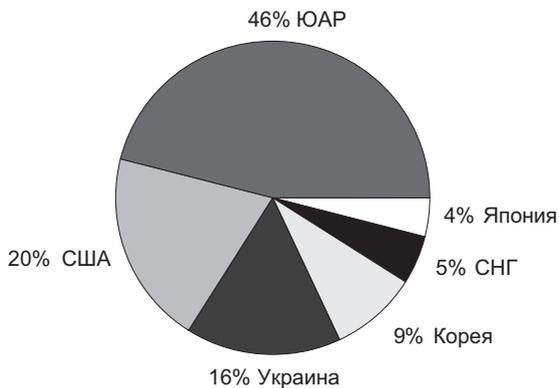


Рис. 1.2. Объемы по производству синтетических алмазов по странам, млн карат (без Китая)

Основными производителями синтетических алмазов в мире являются крупнейшие транснациональные корпорации – Diamond Innovations (бывшая General Electric) и Element Six (бывшая De Beers Industrial Diamonds). В частности, на долю этих двух компаний приходится около 80–85% европейского рынка синтетических алмазов.

В последние годы существенное влияние на общие тенденции мирового рынка синтетических алмазов оказал бурный рост индустрии в Китае. Несмотря на то что основные объемы алмазов производятся для внутреннего потребления, китайские производители стали крупными экспортерами. По данным статистики КНР, экспорт искусственных алмазов оценивается в 141 млн карат, что составляет более 10% мирового производства среднепрочных и высокопрочных синтетических алмазов для инструмента на металлических связках. Продукция производства КНР в некоторых отраслях стала наиболее выгодной для конечного потребителя по критерию соотношения «цена–качество». В сложившихся условиях производители синтетических алмазов, включая крупнейших игроков, вынуждены снижать цены на продукцию и переносить производство в страны «третьего мира» в целях снижения издержек производства, как поступила одна из крупнейших компаний, De Beers, перенесшая производство (подразделение Element Six) из Ирландии в ЮАР.

Основными факторами, определяющими спрос на порошок синтетических алмазов, является рост таких отраслей, как машиностроение и металлообработка, аэрокосмическая промышленность, строительство и камнеобработка, электротехническая индустрия, нефтедобыча.

Так, в ближайшие 5 лет ожидается рост мировой машиностроительной индустрии в среднем – на уровне 2% ежегодно. При этом основными регионами роста станут развивающиеся страны – Китай, Индия, Таиланд, Филиппины. Возрастает роль Китая на мировом рынке автомобилестроения, который занимает 4-е место после США, Японии и Германии. В США прогнозируется рост производства в оборонной промышленности и авиационной. Пропорционально возрастает спрос на инструменты

из сверхтвердых материалов. Рост рынка производства алмазов (в каратах) в 2005 г. составил 9,5% в России и 1% на Украине, 100 млн карат ежегодно используется для технических целей. На рис. 1.3 показано процентное соотношение потребляемых алмазов для различных видов продукции.

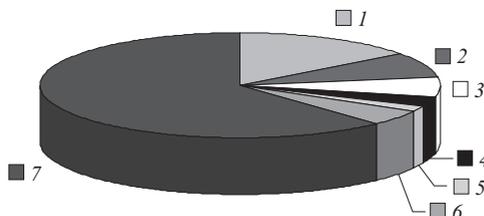


Рис. 1.3. Диаграмма потребления алмазов в технических целях: 1 – режущий инструмент – 14,6%; 2 – пасты – 7,9%; 3 – фильтры – 6%; 4 – буровой инструмент – 3,3%; 5 – правящий инструмент – 1,5%; 6 – остальное – 4,7%; 7 – шлифовальный инструмент – 62%

В табл. 1.2 представлен прогноз потребности в технических алмазах, а в табл. 1.3 темпы роста потребления алмазосодержащих композиционных материалов (АКМ) при производстве инструмента для абразивной обработки.

Таблица 1.2. Прогноз потребности в технических алмазах, млн карат

Страна	1985 г.	2000 г.	Производство в 2005 г.		Вероятный спрос в 2011 г.
			диапазон производства		
			min	max	
США	37,0	70,5	100,5	205,5	180,0
Европа	80,0	150,0	200,0	400,0	290,0
Мировой спрос	117,0	220,0	380,5	650,0	490,8

Таблица 1.3. Темпы роста потребления алмазосодержащих композиционных материалов в абразивной обработке, % от общего количества инструмента

Страна	1990 г.	2000 г.	2010 г.
США	15	25	40
Европа	15	25	40
Япония, Южная Корея, Китай	35	40	60

При этом соотношение потребляемых в инструментальной промышленности природных и синтетических алмазов составило:

в 1990 г. – 100 карат природных алмазов, 85 карат – синтетических (для алмазно-абразивного инструмента – 93 карата);

в 2000 г. – 100 карат природных, 120 синтетических алмазов;

в 2010 г. – 100 карат природных, 180 карат синтетических алмазов.

В зависимости от размера зерен и метода получения синтетических алмазов они делятся на шлифпорошки (размер зерен – от 40 до 3000 мкм), микропорошки (размер зерен – от 1 до 80 мкм), субмикропорошки (размер зерен от 0,1 до 1 мкм) (ГОСТ 9206–80). По размерам зерна сортируются путем рассева на ситах (вибрационно-ситовой, воздушно-ситовой рассев; гидравлический рассев при статической и центробежной седиментации) [17, 32].

Обозначение зернистости порошков предусмотрено в виде дроби, числитель которой соответствует размеру ячейки верхнего сита в свету, а знаменатель дроби равен размеру ячейки нижнего сита в свету, на котором зерна задерживаются (например, 315/250; 100/80). Следовательно, эти размеры не равны фактическим размерам зерен, которые можно измерять при контроле под микроскопом. Зернистость шлифовальных порошков регламентируется в двух диапазонах: широком и узком. В широком диапазоне пределы размеров зерен основной фракции больше (например, 400/250), чем в узком (например, 400/315 и 315/250). Широкий диапазон содержит пять зернистостей: от 400/250 до 63/40, а узкий – двенадцать: от 630/500 до 50/40 [29].

Выпускаются микропорошки одиннадцати номеров зернистостью от 60/40 до 1/0 с содержанием основных фракций до 65%. Содержание побочных фракций в микропорошках: крупной – не более 5%, мелкой – не более 30%. В зависимости от происхождения приняты следующие буквенные обозначения: **А** – природный алмаз; **АС** – синтетический алмаз; **АР** – синтетический поликристаллический, к которому добавляют буквенный индекс, обозначающий тип поликристаллического алмаза: **В** – типа «баллас», **К** – типа «карбонадо», **С** – типа «спеки», **Т** – алмаз синтетический повышенной термостойкости, **Н** – алмаз синтетический

магнитный (имеет повышенные диэлектрические свойства), А – алмаз синтетический повышенной адсорбционной активности. Добавленный цифровой индекс обозначает для синтетических алмазов среднее арифметическое значение показателей прочности на сжатие всех зернистостей, для поликристаллических синтетических алмазов – сотую часть среднего арифметического значения показателей прочности на сжатие всех зернистостей марки. Физико-механические свойства графита и алмаза представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Физико-механические свойства графита и алмаза

Свойство	Графит (МПГ)	Алмаз
Кристаллическая структура	Гексагональная	Кубическая
Постоянная решетки, нм	0,669	0,356
Плотность, г/см ³	2,26	–
Теплостойкость, К	~ 4000	~ 1000
Микротвердость, ГПа	–	100

Форма зерен. В результате синтеза наряду с правильно ограниченными кристаллами получают плотные сростки и агрегаты, имеющие незначительную механическую прочность. По форме зерен алмазного порошка можно выделить три группы алмазов: монокристаллы, плотные сростки и агрегаты, содержание которых соответствует маркам алмазного порошка.

К первой группе относятся хорошо ограниченные монокристаллы, а также их обломки, двойники и кристаллы с одиночными сростками мелких алмазов. Форма алмазов изометрическая и дефектная. Вторая группа включает плотные сростки из двух-пяти кристаллов. Обычно зерна имеют изометрическую форму. К третьей группе относятся агрегаты – зерна, состоящие из сростков многочисленных мелких кристаллов.

На рис. 1.4 приведена форма зерен алмазных порошков, выпускаемых заводом «Кристалл» (Гомель) и фирмой «De Beers» (Бельгия).

Наиболее часто встречаются зерна, напоминающие ромбододекаэдр, октаэдр, ромбододекаэдр, гексаэдр, октаэдр и трапещиоид тригональный. Иногда встречаются зерна в форме ромби-

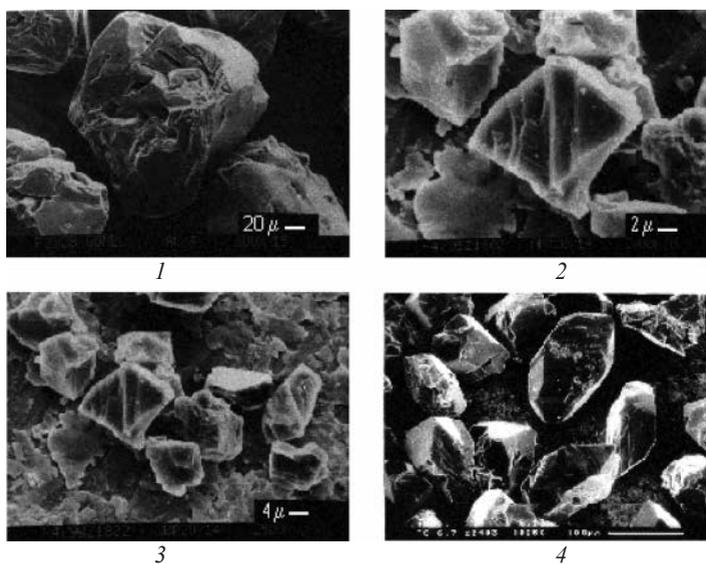


Рис. 1.4. Форма алмазного порошка: 1, 2, 3 – «Кристалл»; 4 – «De Beers»

ческого тетраэдра, трехгранной призмы, усеченного конуса и в виде более сложных форм. Форма зерен влияет на функциональные свойства АКМ, поэтому при наличии острых граней возникает необходимость ее корректировки, которая осуществляется механической обработкой, дроблением или химической овалацией, в том числе созданием на поверхности алмазов функциональных покрытий [34–39]. Коэффициент формы алмазного зерна рассчитывают по отношению длины зерна к его ширине (табл. 1.5).

Таблица 1.5. Марки алмазных порошков и их характеристики [9, 29, 75]

Марка алмазного порошка	Характеристика
АС2	Алмазы повышенной хрупкости, зерна которых представлены агрегатами с развитой поверхностью
АС4	То же, зерна которых представлены агрегатами и сростками
АС6	Алмазы, зерна которых представлены отдельными кристаллами с развитой поверхностью, агрегатами и сростками
АС15	Алмазные зерна представлены агрегатами и сростками (не более 20%), а также удлиненными кристаллами с коэффициентом формы зерен от 1,3 до 3,0

Окончание табл. 1.5

Марка алмазного порошка	Характеристика
АС20	Алмазы, зерна которых представлены агрегатами и сrostками (не более 40%), а также удлинёнными кристаллами с коэффициентом формы зерен от 1,3 до 3,0
АС32	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками и агрегатами (не более 15%) с коэффициентом формы зерен не более 1,2
АС50	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками и агрегатами (не более 12%) с коэффициентом формы зерен не более 1,2
АС60	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками и агрегатами (не более 10%) с коэффициентом формы зерен не более 1,2
АС80	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками (не более 8%) с коэффициентом формы зерен не более 1,1
АС100	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками (не более 6%) с коэффициентом формы зерен не более 1,1
АС125	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками (не более 4%) с коэффициентом формы зерен не более 1,1
АС160	Алмазы, зерна которых представлены кристаллами, а также сrostками (не более 2%) с коэффициентом формы зерен не более 1,1
АРВ1	Поликристаллические алмазы типа «баллас»
АРР4	Поликристаллические алмазы типа «карбонадо»
АРС3	Поликристаллические алмазы типа «спеки»
АРС4	То же с коэффициентом формы 1,5
<i>Микропорошки</i>	
АМ	Природные алмазы нормальной абразивной способности
АСМ	Синтетические алмазы нормальной абразивной способности
АН	Природные алмазы повышенной абразивной способности
АСН	Синтетические алмазы повышенной абразивной способности
<i>Субмикропорошки</i>	
АМ5	Природные алмазы с содержанием крупной фракции до 5%
АСМ5	Синтетические алмазы, содержащие до 5% крупной фракции
АМ1	Природные алмазы с содержанием крупной фракции до 1%
АСМ1	Синтетические алмазы с содержанием крупной фракции до 1%

Концентрация алмазов. В обычном абразивном инструменте количественное соотношение между объемным содержанием зерен, связки и пор принято оценивать системой структур. Каждой структуре, независимо от зернистости и твердости инструмента, соответствует определенный процент абразивных зерен. Для инструментов при одном и том же объемном содержании алмазных зерен увеличивают или уменьшают количество связки в зависимости от требуемой степени твердости [29, 32].

В алмазно-абразивном инструменте содержание алмазного порошка принято оценивать концентрацией и выражать ее в процентах. Условно за 100%-ную концентрацию алмаза в алмазном слое принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 карата в 1 см^3 или 0,878 мг в 1 мм^3 алмазного слоя. В этом случае содержание алмазов в круге определяется формулой:

$$A = K_0KV, \quad (1.1)$$

где K_0 соответствует $8,78 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$; K – концентрация алмазов, %; V – объем алмазосодержащего материала, см^3 .

Принимая для синтетических алмазов $\gamma = 3,53 \text{ г/см}^3$, получим $V = 0,25 K$, т. е., иными словами, можно сказать, что концентрация определяется по отношению объема алмазов к 1/4 полного объема алмазного слоя круга. Нетрудно установить, что при 400%-ной концентрации (т. е. при содержании алмаза $3,51 \text{ мг/мм}^3$) весь объем алмазного слоя будет занят алмазами. На практике пользуются инструментами, которые имеют концентрацию алмазов 25–200%.

Различными исследователями показано, что:

1) количество режущих точек на единице поверхности инструмента из АКМ значительно меньше, а расстояние между ними больше, чем в абразивных кругах, не содержащих алмазные зерна [26];

2) с уменьшением номера зернистости и увеличением концентрации алмазных порошков количество их на единице поверхности круга увеличивается, а расстояние между ними уменьшается (табл. 1.6) [12, 31, 54];

3) количество режущих точек в кругах из синтетических алмазов несколько больше, чем в кругах из природных алмазов [15, 16, 25].

Таблица 1.6. Количество зерен на единице поверхности абразивного круга и расстояние между ними [4, 11–14, 29] при концентрациях 200 и 50%

Концентрация 50%		Концентрация 200%
Зернистость, мкм	Число зерен, шт/мм ²	Расстояние между зёрнами, мм
25	16	16
8,9	11,9	0,29
15,5	19,3	0,23
4,7	9,5	0,51
6,0	12,0	0,29

При этом свойства и структура синтетических алмазов, производимых различными фирмами, отличаются, что затрудняет разработку технологий получения алмазосодержащих композиционных материалов и инструментов из них. Хотя алмаз является наиболее перспективным абразивным материалом, он имеет существенный недостаток – невысокую теплостойкость. При нагреве на воздухе до температуры 700–800 °С алмаз сгорает и превращается в графит или аморфный углерод, а при обработке сплавов, содержащих железо, наблюдается даже растворение железа [10]. В процессе работы алмаз подвергается различным видам износа: адгезионному, абразивному, диффузионному, химическому, а также графитизации. По мнению ряда исследователей, основной причиной выхода из строя алмаза является графитизация. В работах таких исследователей, как М. Т. Забавский [40], П. И. Ящерицын [41], А. П. Семенов, В. В. Поздняков [17], И. Икава и Т. Танака [21], доказывается, что именно выделение графита на поверхности алмаза является основной причиной потери режущих свойств и повышенного износа алмаза. Интенсивность износа алмаза вследствие графитизации примерно в 3 раза выше интенсивности диффузионного износа [31]. Резко снижает работоспособность инструмента также налипание обрабатываемого материала на алмаз из-за увеличения сил резания, увеличения поверхности трения с обрабатываемой деталью и соответственно работы трения. Улучшение свойств, в частности снижение

скорости окисление алмазов, может быть достигнуто нанесением стеклопокрытий на алмазные зерна, что показано украинскими учеными Н. Б. Новиковым, А. Е. Шилю [32]. Вообще же существует много способов нанесения покрытий, например осаждением из газовой фазы, пропиткой из расплава, металлизацией путем электронно-плазменного распыления и конденсации в вакууме, гальваническим способом из жидкой фазы, агрегированием группы зерен в расплавах [42, 43]. Методы отличаются сложным аппаратным оснащением, не позволяют получать покрытия контролируемой толщины, что препятствует их использованию при создании АКМ нового поколения, поэтому решалась задача нанесения защитных покрытий новыми методами, не требующими специального аппаратного оснащения и относительно простыми в технологическом исполнении.

Структура и свойства связки инструмента из АКМ. Эффективность использования алмазов, эксплуатационные свойства инструментов и оптимальные условия их применения в значительной мере зависят от матрицы АКМ (связка, когда речь идет об инструменте), цементирующей алмазные зерна и позволяющей им воспринимать внешние силовые и температурные воздействия в процессе работы. Для изготовления алмазных кругов применяют три группы связок: органические, керамические и металлические. Связка, в свою очередь, может состоять либо из одного связующего, либо связующего и наполнителя. От состава связки зависит режущая способность абразивного инструмента и, следовательно, качество обрабатываемой с его помощью поверхности детали. Разрабатываются материалы на керамических связках, что, во-первых, отражает общую тенденцию в развитии алмазосодержащих композиционных материалов (процентное отношение АКМ на керамических связках к другим в 1990 г. составило 10%, в 2000 г. – 30%, а в 2005 г. прогнозируется 50% всего шлифовально-абразивного инструмента в мире выпускать на керамических связках), во-вторых, объясняется тем, что применение керамических связок позволяет увеличить в 3–20 раз скорость резания обрабатываемого материала (стекло и керамика).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень условных обозначений	3
Введение	5
<i>Глава 1. Анализ состояния и перспективы развития алмазосодержащих композиционных материалов (АКМ) для абразивной обработки</i> ..	9
1.1. Проблемы создания инструмента из АКМ с требуемым комплексом эксплуатационных параметров	9
1.1.1. Влияние компонентов АКМ на внутреннюю структуру и свойства	10
1.1.2. Существующие способы активации и модификации стеклокерамических связей	34
1.1.3. Влияние прочности связи между компонентами на свойства АКМ и эксплуатационные параметры инструмента из него	40
1.2. Анализ условий резания абразивным инструментом	50
1.2.1. Схема сил, действующих в зоне контакта абразивного инструмента и обрабатываемой детали	50
1.2.2. Исследование и определение параметров оптимизации, значимых факторов процесса абразивной обработки. Определение интервалов варьирования исследований	57
1.3. Влияние структуры рабочего слоя на износ рабочей поверхности инструмента в условиях абразивной обработки	65
Выводы к главе 1	69
<i>Глава 2. Теоретические основы формирования эффективных алмазосодержащих композиционных материалов</i>	71
2.1. Исследование механизмов разрушения в АКМ	71
2.1.1. Изучение особенности разрушения стекломатрицы	75
2.1.2. Моделирование пористой структуры стеклокерамической матрицы, исследования распространения трещин и оптимизация структуры для повышения трещиностойкости	80

2.1.3. Наноструктурированные глобулы для модификации стекломатрицы	89
2.2. Теоретические предпосылки модификации АКМ формированием керамических нанослоев на алмазных зернах	92
2.3. Исследование влияния степени физико-химического взаимодействия компонентов на прочностные характеристики и механизмы разрушения АКМ.	106
2.4. Общая характеристика природы усталостного разрушения в АКМ.	111
2.5. Взаимосвязь структурных, термодинамических и эксплуатационных свойств АКМ, модифицированных нанокompонентами.	115
Выводы к главе 2.	127
Глава 3. Исследование связи между структурой рабочего слоя, внутренней структурой и эксплуатационными параметрами.	129
3.1. Структурные особенности рабочей поверхности абразивного инструмента из АКМ. Изменение морфологии рабочей поверхности инструмента в процессе абразивной обработки	130
3.1.1. Исследование влияния характеристик АКМ на износ рабочей поверхности инструмента и морфологию обрабатываемой поверхности.	134
3.2. Исследования характеристик контактного взаимодействия рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности.	146
3.3. Анализ напряженно-деформированного состояния рабочего слоя	151
3.4. Исследование влияния физико-механических свойств связки на величину локальной деформации в системе зерно–связка	156
Выводы к главе 3.	166
Глава 4. Разработка технологических основ наноструктурирования компонентов для активации и модификации алмазосодержащих композиционных материалов	169
4.1. Основные положения активации стеклокерамических матриц АКМ	169
4.2. Исследование влияния характеристик исходных компонентов на уплотнение и структурообразование АКМ.	174
4.3. Исследование особенностей формирования наноразмерных активирующих порошков стеклосвязки и покрытий на абразивных зернах	177
	317

4.3.1. Исследования физико-химических процессов активации и модификации кремнеземсодержащих золь-гельных связей АКМ	177
4.3.2. Исследование особенностей модифицирования алмазных зерен путем нанесения наноструктурированных покрытий методом термоллиза	183
4.3.3. Формирование металлических и ультрадисперсных композиционных покрытий на основе меди на поверхность алмазного порошка	203
Выводы к главе 4.	214
Глава 5. Технологические основы создания абразивного инструмента из АКМ.	216
5.1. Исследование влияния режимов диспергирования компонентов шихты на физико-механические свойства АКМ	219
5.1.1. Роль наноразмерности защитных покрытий в повышении технологических свойств шихты	221
5.2. Особенности формования абразивного инструмента из АКМ	230
5.2.1. Оптимизация режимов статического прессования абразивного инструмента из АКМ	230
5.2.2. Особенности литья под давлением инструмента из АКМ	232
5.3. Формирование структуры и свойств инструмента в процессе термической обработки	233
5.3.1. Исследование влияния дисперсности шихты на спекание АКМ	234
5.3.2. Структурообразование АКМ в процессе спекания инструмента	239
5.3.3. Влияние состава связки на физико-механические свойства материала	243
5.4. Основные положения выбора исходных данных для разработки технологических процессов, технических условий и технологического проекта на технологический участок по выпуску абразивного инструмента на стеклокерамических связках	248
5.5. Определение комплекса мероприятий по освоению выпуска абразивного алмазного инструмента	261
Выводы к главе 5.	265
Глава 6. Практическая реализация и перспективы использования результатов исследований	269
6.1. Влияние структуры на работоспособность инструмента из АКМ	270
6.2. Обработка неметаллических материалов.	274

6.3. Обработка керамики инструментом из АКМ	279
6.4. Обработка металлических материалов.	283
6.5. Потенциальные области применения результатов исследований	291
Заключение	293
Литература.	298