

2. Порошки и пасты из синтетических алмазов / Ю. И. Никитин, С. М. Уман, Л. В. Коберниченко, Л. М. Мартынова. – К.: Наук. думка, 1992. – 284 с.
3. Никитин Ю. И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1984. – 264 с.
4. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Увед. 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995.
5. Патент на винахід 53964. Україна, МПК (2006) G01N 33/40. Спосіб оцінки однорідності абразивного порошку / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова, Г. А. Петасюк. – Заяв. 29.03.02; Опубл. 15.02.06. Промислова власність, Бюл. № 2.
6. Новиков Н. В., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Компьютеризированные методы неразрушающего контроля прочностных свойств алмазных шлифпорошков // Инструмент. світ.- 2006. – № 3(31).– С. 4–6.
7. Деклараційний патент на корисну модель 4821. Україна, МПК C01B 31/06. Спосіб виготовлення шліфпорошків із надтвердих матеріалів / М. В. Новіков, Ю. І. Нікітін, Г. П. Богатирьова, Г. А. та ін.- Заявл. 27.04.04; Опубл. 15.02.05 Промислова власність, Бюл. № 2.
8. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial diamond review. – 2006. - № 1. – С. 42 – 47.
9. Новиков Н. В., Шепелев А. А.: Современные технологии обработки и инструменты из сверхтвердых материалов ИСМ НАН Украины в машино- и приборостроении // Инструмент. світ.– 2001.– № 10 –1 1. – С. 10 – 16.

Поступила 15. 05. 2009 г.

УДК 621.921.34:621.921.34–413:621.923.4:662.23.05

А. А. Шульженко¹, член-кор. НАН Украины, **Е. Е. Ашкинази**², **А. Н. Соколов**¹,
В. Г. Гаргин¹, кандидаты технических наук, **В. Г. Ральченко**², канд. физ.-мат. наук,
В. И. Конов², член-кор. РАН, **Л. И. Александрова**¹, **Р. К. Богданов**¹, **А. П. Загора**¹, канди-
даты технических наук, **В. Н. Ткач**¹, канд. физ.-мат. наук, **Н. И. Зайка**¹; **И. И. Власов**²,
И. А. Артюков³, **Ю. С. Петронюк**⁴, кандидаты физико-математических наук

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

³Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва

⁴Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, г. Москва

НОВЫЙ УЛЬТРАТВЕРДЫЙ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

A new ultrahard polycrystalline diamond-based composite material (UHM) has been developed using a combination of high-pressure high-temperature (HPHT) sintering technique and chemical vapor deposition (CVD) of diamond. The CVD diamond rods incorporated in a sintered polycrystalline matrix form the reinforced material. The hardness of HPHT-treated ($p = 8$ GPa, $T = 1570$ K) polycrystalline CVD diamond is found to strongly increase up to 140 GPa from initial (for virgin sample) value of 77 GPa. Drilling tools made of UHM showed 6–14 times less wear rate against the korostyshev grainite (XI drilling category) in comparison with standard AKTM tools.

Введение

Как известно, твердость является одним из определяющих свойств материалов инструментального назначения, характеризующих способность материала сопротивляться пластической деформации [1].

Экспериментально твердость оценивают чаще всего по размеру отпечатка в материале при вдавливании в него индентора с определенной нагрузкой и скоростью нагружения. Следовательно, твердость является характеристикой прочности материала в условиях сложнопяженного состояния, возникающего при внедрении индентора и сопровождающегося большими пластическими деформациями в зоне испытания, и связана, как с механическими свойствами – упругостью, пределами прочности и текучести, так и с термодинамическими характеристиками веществ – энергиями кристаллической решетки, разрыва химических связей, поверхностной, а также теплотой плавления.

Высокие темпы развития материаловедения во второй половине прошлого века способствовали созданию большого количества высокотвердых материалов, в связи с чем возникла необходимость классификации этих материалов. Так к высокотвердым материалам предлагается относить материалы с твердостью 5–20 ГПа, т. е. твердость которых превышает твердость металлов, а к сверхтвердым – материалы, твердость которых превышает твердость природного корунда (20 ГПа) [2].

В результате изучения особенностей формирования материалов с высокими физико-механическими характеристиками, применения новейших технологий – техники сверхвысоких давлений (> 15 ГПа) [3], использования материалов наноструктурного диапазона [4], специальных методов воздействия на материал [5, 6] – существенно пополнился перечень сверхтвердых материалов, в том числе были получены материалы, твердость которых превышает твердость монокристаллов природного алмаза.

На основании анализа состояния проблемы, проведенного на Первом международном совещании по сверхтвердым материалам (Франция, 2003), было предложено относить к сверхтвердым материалы твердостью более 40 ГПа, к ультратвердым – твердостью более 70–80 ГПа [7]. По нашему мнению, такое разделение недостаточно обосновано. Во-первых, при таком подходе из разряда сверхтвердых выпадают многие поликристаллические композиционные материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора, например амборит и киборит, которые традиционно относились к сверхтвердым материалам. Во-вторых, физические теории твердого тела на сегодняшний день не в состоянии описать твердость различных материалов из-за неопределенного многообразия факторов, от которых она зависит. Поэтому понятие «твердость» без указания метода и условий измерения является неопределенным. Под этим понятием подразумевают не физическую постоянную, характеризующую материал, а одну из величин, измеренную одним из методов и зависящую не только от материала, но и от условий и метода измерения [8].

По нашему мнению к сверхтвердым следует относить материалы твердостью 20–120 ГПа, т. е. твердость которых превышает твердость природного корунда и может достигать твердости грани (111) монокристаллов природного алмаза, ультратвердыми – материалы твердостью более 120 ГПа. Причем, указанные значения должны быть измерены пирамидой Виккерса при нагрузке на индентор 9,8 Н.

Цель настоящей работы – исследовать свойства разработанного совместно ИСМ НАН Украины и ИОФ РАН нового гибридного поликристаллического композиционного ультратвердого материала (УТМ) на основе армирования поликристаллического алмазного композита (АКТМ [9]) поликристаллическим алмазом, который выращивается методом осаждения из газовой фазы (CVD-алмазом). Таким образом, в основе изготовления рассматриваемого УТМ лежит комбинация техники высоких давлений и CVD-метода.

Актуальность работы заключается в следующем. Как известно, композиционные сверхтвердые материалы на основе поликристаллических PCVD-алмазов широко применяют при изготовлении режущего и бурового инструмента (долот, коронок, резцов) [10, 11]. CVD-

алмаз, приближающийся по свойствам к совершенным монокристаллам алмаза [12], также все шире применяют как инструментальный материал, в частности, как покрытие на вставках режущего инструмента. Разнообразные режущие и сверлильные инструменты, в частности буровые головки, развертки, зенковки с CVD-алмазными покрытиями, в настоящее время доступны для механической обработки цветных металлов, пластмасс и композиционных материалов. Однако существуют технологические препятствия на пути получения эффективного инструмента на основе CVD-алмаза. Во-первых, это характерный для алмаза как такового и CVD-алмаза в частности низкий коэффициент теплового расширения. Во-вторых, это анизотропия свойств поликристаллических CVD-алмазов, обусловленная колончатый строением кристаллитов. Эти факторы при изготовлении инструмента традиционными способами на основе CVD-алмаза и его эксплуатации часто приводят к возникновению опасных термонапряжений в материале, которые ведут к его разрушению.

Указанные препятствия в значительной степени были преодолены при разработке нового способа спекания [13] гибридного ультратвердого поликристаллического композиционного материала, армированного CVD-алмазом, периметр которого частично или полностью в условиях высокого давления и температуры покрыт оболочкой из АКТМ, со связями типа «алмаз–алмаз» между зернами алмаза в композите и элементом армирования и диспергированием в пространстве между ними активирующей добавки.

В настоящей работе обсуждаются результаты элементного анализа, исследования структуры и физико-механических свойств CVD-армированного ультратвердого поликристаллического композиционного материала, а также его практическое применение в качестве вооружения породоразрушающего инструмента.

Материалы и методики экспериментов

В качестве исходных материалов использовали алмазный микропорошок АСМ 40/28 [14], монокристаллы синтетического алмаза и пластины поликристаллического CVD-алмаза, полученного в ИОФ РАН методом осаждения в СВЧ плазме в смесях метан–водород [15]. Брусочки размером 4×0,9×0,5 мм поликристаллического CVD-алмаза, которые использовали в экспериментах, показаны на рис. 1.

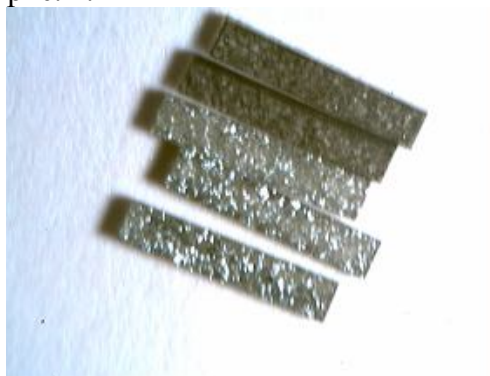


Рис. 1. Внешний вид пластинок CVD-алмаза

Спекание нового УТМ проводили в многопозиционной матрице, которая была спрессована из чешуйчатого графита с частичками линейным размером 0,5–1,0 мм и толщиной около 1 мкм. Матрица имела диаметр 18 мм и высоту 5 мм с цилиндрическими гнездами диаметром 4,5 мм, в которые засыпали алмазный микропорошок АСМ 40/28. Далее на поверхность алмазной массы укладывали пластинку из поликристаллического CVD-алмаза (или монокристалл синтетического алмаза) и вдавливали ее пуансоном в алмазную массу.

Для формирования пропитывающего слоя приготовили смесь из порошка кремния с частицами размером менее 100 мкм, чешуйчатого графита и алмазного нанопорошка с частицами размером менее 0,01 мкм. Однородность смеси обеспечивали смешиванием компонентов в шаровой мельнице. Из полученной смеси спрессовали диски, закрывающие гнезда матрицы, в которых размещалась алмазная масса с пластинкой CVD-алмаза. Матрица помес-

тили в ячейку высокого давления. Материал спекали в аппарате высокого давления типа «то-роид» с диаметром центрального углубления 30 мм.

Спекание осуществляли в два этапа [16].

На первом этапе содержимое многопозиционной матрицы подвергали баротермической обработке при давлении 8 ГПа и температуре 1170 К в течение 50 с. Затем температуру повышали до температуры плавления кремния при заданном давлении (1570 К) и выдерживали содержимое матрицы в течение 90 с.

После спекания поверхность полученных образцов композиционного материала на основе PCD- и CVD-алмаза диаметром 4 мм и высотой 4,5 мм подвергали химической обработке в целях очистки от остатков графита.

Элементный анализ полученного материала выполняли с помощью растрового электронного микроскопа ZEISS EVO 50XVP фирмы «ZEISS», укомплектованного энергодисперсионным анализатором рентгеновских спектров INCA450 с детектором INCAPentaFETx3 с рабочей площадью Si(Li) детектора 30 мм² и системой HKL CHANNEL-5 для дифракции отраженных электронов фирмы «OXFORD» [17].

В качестве метода неразрушающего исследования внутренней трехмерной структуры CVD-алмазов, армированных АКТМ, впервые применили рентгеновскую микротомографию (PMT) [18]. Сканирование производили микротомографом SKYSCAN 1074 в следующих условиях: напряжении на аноде $U = 40$ кВ (вольфрамовый анод), силе тока на аноде $I = 1$ мА, шагу по углу – $0,9^\circ$, продолжительности экспозиции – $0,24$ с, пространственном разрешении по объекту – около 20 мкм. Мягкий рентгеновский спектр обеспечивает необходимые контрастно-пространственные характеристики при исследовании сравнительно легких углеродсодержащих материалов. Результаты томографических исследований, представляя полезную информацию об объемном распределении различных соединений и неоднородностей в теле образца, дополняют другие аналитические методы. В томограмме использовали разделение цветов по трем грациям плотности, различающимся приблизительно на 20 % (более темный цвет означает большую рентгеновскую плотность).

Упругие свойства композитов и CVD-алмаза исследовали методом акустической микроскопии [19]. Этот метод позволяет измерять задержки ультразвуковых эхоимпульсов, отраженных от передней поверхности и дна образца; тем самым определяется скорость звука c_L в образце при известной его толщине. При этом использовался импульсный сканирующий акустический микроскоп с длиннофокусной акустической линзой: угол раскрытия линзы в воде, которую применяли в качестве иммерсионной жидкости, составлял 11° ; диаметр фокальной перетяжки соответствовал, приблизительно, 60 мкм. Измерения объемных свойств выполняется на частоте 50-100 МГц, что позволяет определить величину скорости звука в материале с точностью до 0,5 км/с.

Локальные спектры комбинационного рассеяния (КР) света образцов снимали на установке LABRAM HR в геометрии рассеяния назад (длина волны возбуждающего излучения Ag⁺ лазера – 488 нм, диаметр лазерного пятна на поверхности образца – около 1 мкм).

Для исследования физико-механических свойств образцы с помощью пластмассы закрепляли в металлической оболочке и изготавливали шлифы последовательным шлифованием свободным абразивом (микropорошками алмаза) их торцевой поверхности.

Твердость УТМ определяли микротвердомером ПМТ, используя в качестве индентора алмазную пирамиду Виккерса [20]. Твердость определяли по общепринятой формуле $HV = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}$, где P – нагрузка на индентор; d – среднее арифметическое двух диагоналей отпечатка. Твердость измеряли при нагрузке на индентор 4,9 и 9,8 Н. Размер диагоналей отпечатка измеряли с помощью оптического микроскопа «Неофот» при увеличении 800×.

Выбранный диапазон нагрузки на индентор при измерении твердости можно считать оптимальным, поскольку при использовании обеих нагрузок на индентор была получена практически одинаковая твердость, к тому же при внедрении индентора испытываемый мате-

риал не разрушался, о чем свидетельствовало отсутствие трещин в углах отпечатков, оставленных индентором. При измерении твердости особое внимание уделяли состоянию вершины алмазной пирамиды, которое оценивали по результатам измерения отпечатков на полированной поверхности эталонных образцов из металлического вольфрама твердостью около 4 ГПа. После каждых трех измерений твердости исследуемых образцов на эталонный образец наносили отпечаток. Размеры диагоналей образца сравнивали с теми, которые имели отпечатки, оставленные на эталонном образце алмазной пирамидой после ее изготовления. В случае отклонения размера диагоналей отпечатка от начального более чем на 3 % алмазную пирамиду переограняли. В процессе измерения твердости в использованном диапазоне нагрузок на индентор не были отмечены случаи разрушения индентора.

Износостойкость породоразрушающего элемента, оснащенного гибридным поликристаллическим УТМ, исследовали при точении на токарно-винторезном станке модели ДИП-200 коростышевского гранита XI категории буримости. Этот гранит характеризуется стабильными свойствами, высокой твердостью и абразивностью. При этом использовали специальное оснащение для закрепления керна горной породы в виде разрезного цилиндра и станкана, а также специальное приспособление для закрепления исследуемого породоразрушающего элемента в резцедержателе на основе сверлильного патрона. Исследуемый породоразрушающий элемент закрепляли в патроне специального приспособления и подводили к поверхности керна горной породы, где и осуществлялся врезание и дальнейшее точение.

Износ по массе породоразрушающих элементов измеряли электронными весами типа Sartorius.

Параметры режима точения были следующие: частота вращения – 355 мин⁻¹, глубина врезания – 1,0 мм.

Контролируемые параметрами служили глубина врезания (с точностью до 0,05 мм) и время точения (с точностью до 1 с).

Интенсивность изнашивания I (мг/м) определяли как отношение потери массы породоразрушающего элемента $\Delta m = m_n - m_k$ к величине проходки на вставку L , где m_n и m_k (мг) – масса образца соответственно до и после испытаний:

$$I = \frac{\Delta m}{L},$$

где $L = \frac{\pi D n}{60} t$; (D – диаметр керна, м; n – частота вращения шпинделя станка, мин⁻¹; t – продолжительность точения, мин).

Результаты

Внешний вид рабочей поверхности опытных образцов гибридного поликристаллического УТМ с армирующими вставками из CVD-алмаза и монокристалла синтетического алмаза показаны на рис. 2.

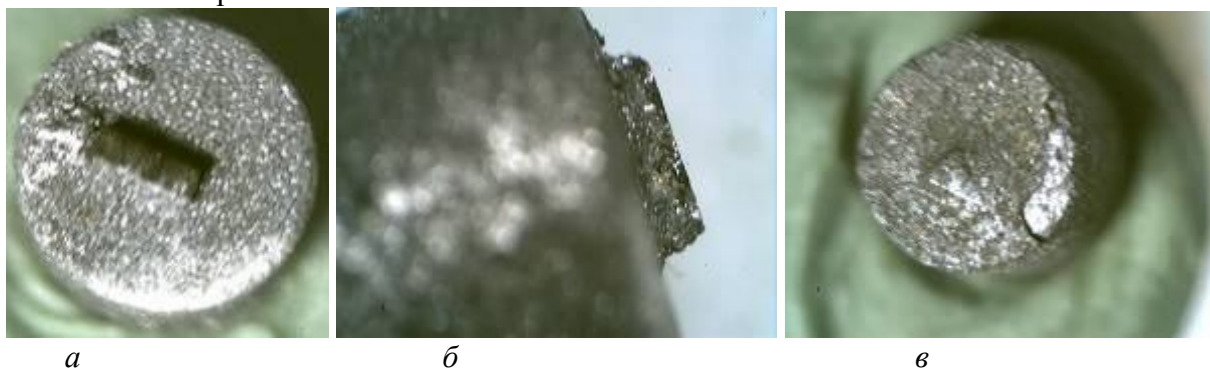


Рис. 2. Внешний вид опытных образцов гибридного поликристаллического УТМ с армирующими вставками из CVD-алмаза (а – вид сверху; б – вид сбоку) и монокристалла синтетического алмаза (в)

Представление о внутреннем строении образца дает трехмерная модель УТМ в виде набора трех взаимно перпендикулярных сечений (диаметрального, сагиттального и меридионального), построенная по результатам томографических исследований (рис. 3).

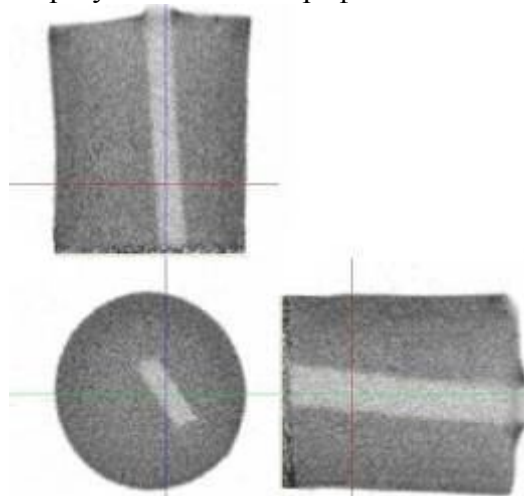


Рис. 3. Трехмерное изображение образца УТМ, полученное методом рентгеновской микро-
томографии (диаметральное, сагиттальное и меридиональное сечения).
Область светлого контраста – пластина CVD-алмаза.

Характерной особенностью РСД-оболочки гибридного ультратвердого поликристаллического композиционного материала является наличие непрерывного жесткого каркаса из сросшихся зерен алмаза, который формируется в области его термодинамической стабильности. Зерна, составляющие каркас, – это, по сути, монокристаллы алмаза, объединяющие уникальные физико-механические и теплофизические свойства. Насколько эти свойства реализуются в поликристалле зависит от степени связи «алмаз–алмаз». Основную роль в этом процессе играет пластическая деформация частиц материала, формирующего оболочку. Для эффективной консолидации частиц в материалах с ковалентными связями (классическим представителем которых является алмаз) путем пластической деформации необходимы высокое давление и температура, соответствующие термодинамической стабильности этих материалов [21].

При изготовлении гибридного поликристаллического УТМ учитывали следующий важный факт. Температура начала пластической деформации для микропорошков алмазов составляет 1220 К при давления 6 ГПа [22]. Расчетно было показано, что при спекании давление в точках контакта алмазных зерен может достигать 130 ГПа. В то же время в порах между частицами алмаза давление при спекании значительно ниже, что является причиной образования в них графита или аморфного углерода [21]. Для преодоления этого нежелательного эффекта необходимо использовать активирующие процесс спекания добавки.

Во-первых, активирующая добавка за счет химического взаимодействия препятствует процессам взаимодействия с кислородом, ведущим к образованию летучих оксидов, вследствие чего повышается пористость материала. Во-вторых, взаимодействуя с другими примесями (в частности, с графитом или аморфным углеродом), активирующая добавка существенно снижает их негативное влияние на физико-механические свойства каркаса. При этом также уменьшается количество пор. Кроме того, активирующая добавка способствует снижению температуры начала пластической деформации на контактах зерен, что обеспечивает повышение прочности поликристаллического каркаса, и ускоряет диффузионные процессы в зоне контакта зерен алмаза, в следствие чего создаются прочные связи «алмаз–алмаз».

В настоящей работе используемый в качестве активирующей добавки кремний, взаимодействуя с графитом или аморфным углеродом в порах образует карбид кремния. Создание дополнительной связи «алмаз–карбид» способствует повышению общей прочности по-

ликристаллической оболочки. Таким образом, при реализации описанного подхода образуется непрерывный жесткий каркас (рис. 4).

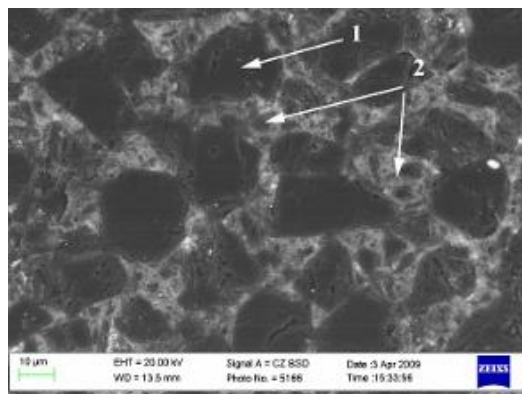


Рис. 4. Структура поликристаллической алмазной оболочки: 1 – алмазное зерно; 2 – разрушенные мелкие зерна алмаза и карбида кремния

Данные, полученные с помощью электронной микроскопии (рис. 5 и 6), свидетельствуют о том, что при изготовлении УТМ формируемая в условиях термодинамической стабильности алмаза поликристаллическая оболочка и CVD-алмаз представляют собой единое целое. Поскольку по физическим свойствам составляющие материала близки, при изготовлении и эксплуатации инструмента влияние термонапряжений будет значительно ниже, чем при использовании традиционных материалов на основе CVD-алмаза, что будет способствовать повышению эффективности его использования благодаря повышению прочности и термостабильности и, как следствие, повышению износостойкости.

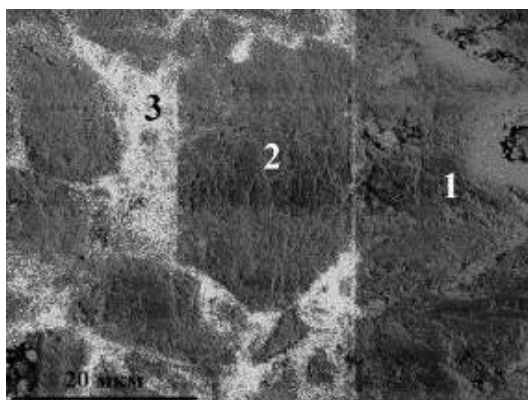
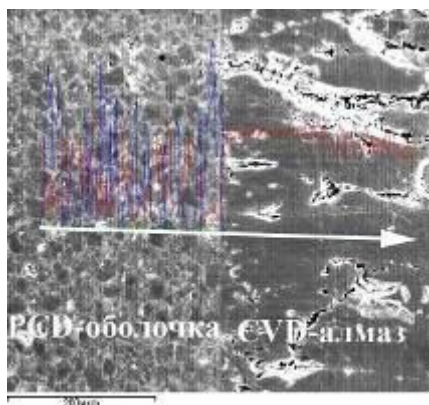
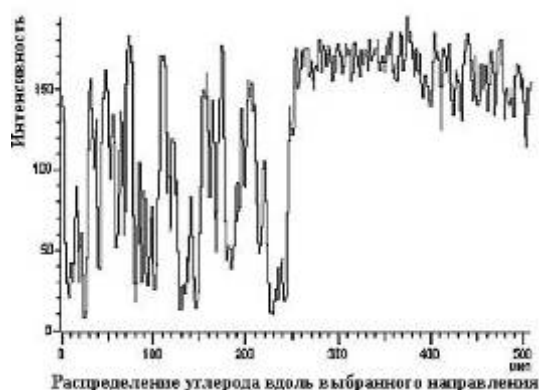


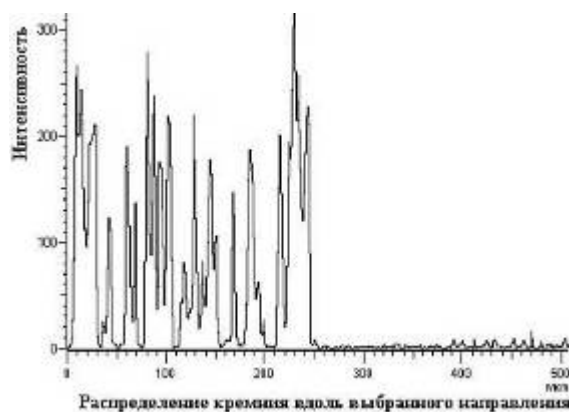
Рис. 5. Изображение во вторичных электронах гибридного поликристаллического УТМ: 1 – CVD-алмаз; 2 – алмазное зерно матрицы; 3 – мелкие зерна алмаза и карбида кремния



а



б



6

Рис. 6. Изображение во вторичных электронах гибридного поликристаллического УТМ (а) и распределение углерода (б) и кремния (в) вдоль выбранного направления (б)

Оценить степень однородности полученного гибридного поликристаллического УТМ можно также путем изучения упругих свойств композита и CVD-алмаза методом акустической микроскопии.

Значения измеренной величины скорости звука приведены в табл. 1. Скорость объемной продольной акустической волны в CVD-алмазе $c_L = 18,0 \pm 0,5$ км/с близка к скорости для монокристаллов алмаза $17,98 \pm 0,1$ км/с [23]. В АКТМ скорость звука ниже: $16,0 \pm 0,5$ км/с.

Таблица 1. Измеренная методом акустической микроскопии скорость c_L продольного звука в алмазных образцах

Наименование образца	Скорость продольных упругих волн c_L , км/с
АКТМ	$16 \pm 0,5$
АКТМ с частицами CVD-алмаза	$17 \pm 0,5$
CVD-алмаз	$18 \pm 0,5$

Спектры КР образцов показаны на рис. 7.

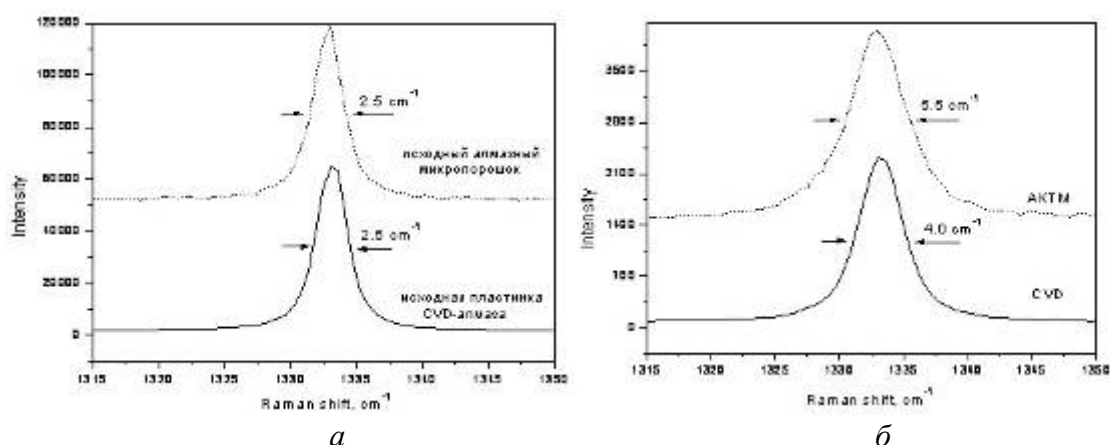


Рис. 7. Спектры КР исходного алмазного микропорошка АСМ 40/28 и пластины CVD-алмаза до спекания (а), и после спекания в гибридный поликристаллический композит УТМ (б)

Спектры КР исходного алмазного микропорошка АСМ 40/28 и пластины CVD-алмаза вблизи алмазной линии на смещенной частоте $1332,5 \text{ см}^{-1}$ показаны на рис.7, а. Ширина линии $2,5 \text{ см}^{-1}$, измеренная на полувысоте ее интенсивности, в обоих спектрах свидетельствует о высоком структурном совершенстве исходных алмазных материалов. Обнаружено, что по-

сле спекания ширина алмазной линии вставки из CVD-алмаза увеличивается до 4 см^{-1} (рис. 7, б), что, по-видимому, связано с увеличением концентрации структурных дефектов в этом материале. Результаты анализа поверхности спеченного микропорошка АСМ в различных точках образца УТМ методом КР показали сильный разброс ширины алмазной линии от точки к точке: $2,5\text{--}10 \text{ см}^{-1}$. Алмазная линия спеченного микропорошка АСМ шириной $5,5 \text{ см}^{-1}$ показана на рис. 7, б.

Большее увеличение и разброс ширины линий микропорошка по сравнению с CVD-алмазом объясняется тем, что кроме увеличения структурных дефектов в объеме каждого кристаллита вблизи границ зерен могут возникать напряжения растяжения и сжатия в результате сращивания соседних зерен вдоль границ, ориентированных несимметрично относительно кристаллографических осей кристаллитов. Такие напряжения существенно зависят от ориентации кристаллитов, поэтому неоднородны по спеку и приводят к значительному уширению алмазной линии.

При спекании алмазных поликристаллов на рентгеновском спектре наблюдается уширение дифракционных линий вследствие пластической деформации зерен в процессе формирования связей «алмаз–алмаз» [24]. Наибольшее уширение наблюдается в поликристаллах, показавших наименьший износ при испытаниях на износостойкость. Существенное уширение линий КР в образце УТМ также может свидетельствовать о пластической деформации алмазных зерен, формирующих жесткий каркас материала. Спекание при более высоком давлении способствует началу пластической деформации при более низкой температуре, чем описано в [5, 6].

Оптимальным является использование в качестве рабочей стороны мелкозернистой (размер кристаллитов порядка 1 мкм) стороны пластины (прилегающей к подложке при синтезе алмаза в плазме) [25], поэтому твердость исходной поликристаллической пластины CVD-алмаза измеряли на этой стороне без ее механической обработки. Измеренная твердость составила 77 ГПа . Испытания на неполированной ростовой крупнозернистой стороне (размер кристаллитов $60\text{--}80 \text{ мкм}$) провести не представлялось возможным ввиду ее сильной шероховатости.

Твердость этой же пластины (на торцевой поверхности пластины по нормали к направлению роста пленки), заключенной в РСД-оболочку, после воздействия высоким давлением и температурой ($p = 8 \text{ ГПа}$, $T = 1570 \text{ К}$), составила соответственно 142 и 139 ГПа при нагрузке на индентор $4,9$ и $9,8 \text{ Н}$, т. е. повысилась в $1,8$ раза. Приведенные значения твердости являются средним результатом трех–пяти замеров, среднеквадратическая ошибка не превышала $2,5 \%$. Твердость РСД-оболочки составила порядка 50 ГПа .

Таким образом, твердость пластинки CVD-алмаза, подвергнутой баротермической обработке при формировании поликристаллического гибридного УТМ, существенно повышается. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными в [5, 6], где показано, что баротермическая обработка монокристаллов алмаза различного происхождения (природные, синтетические, полученные CVD-методом) при более высокой температуре ($p = 6 \text{ ГПа}$, $T > 1870 \text{ К}$) способствует увеличению их твердости.

Из УТМ изготовили породоразрушающие элементы, которые подвергли испытанию на износостойкость при точении на токарно-винторезном станке модели ДИП-200 коростышевского гранита XI категории буримости. Для сравнения выбрали породоразрушающие элементы из АКТМ [9]. Образцы породоразрушающих элементов испытывали при скорости резания $2,2 \text{ м/с}$, пути точения 1716 м и продолжительности точения 780 с .

Результаты сравнительных испытаний износостойкости породоразрушающих элементов с различным оснащением приведены в табл. 2.

Как видим, износостойкость породоразрушающих элементов, оснащенных АКТМ, значительно ниже (в 14 раз), чем оснащенных УТМ. При этом интенсивность изнашивания выше в $2,34\text{--}14,4$ раза в зависимости от используемого варианта армирования АКТМ.

Таблица 2. Сравнительные испытания вставок АКТМ при точении коростышевского гранита XI категории по буримости

Состав породоразрушающих элементов	Масса вставки, мг		Интенсивность изнашивания по массе, мг/м
	начальная	конечная	
АКТМ	121,4	107,0	0,0084
УТМ с моно-кристаллом синтетического алмазом	134,2	128,0	0,0036
УТМ с поли-кристаллическим CVD-алмазом	127,2	126,0	0,0006

Выводы

1. Установлено, что пластическая деформация алмазных зерен в процессе формирования жесткого алмазного каркаса УТМ приводит к уширению линий КР как CVD-алмаза, так и алмазов в оболочке из АКТМ.

2. Износостойкость породоразрушающих элементов, оснащенных Впервые установлено, что твердость поликристаллического CVD-алмаза, подвергнутого баротермической обработке ($p = 8$ ГПа, $T = 1570$ К), температура которой значительно ниже, чем в [5, 6], в процессе формирования поликристаллического гибридного УТМ повышается на 80 %.

4. Гибридным поликристаллическим УТМ, при точении коростышевского гранита XI категории буримости в 6–14 раз выше, чем элементов, оснащенных неармированным АКТМ.

5. Разработанный УТМ можно использовать в инструментах, работающих при больших нагрузках, в том числе в буровом инструменте при бурении пород высших категорий твердости.

Литература

1. Сверхтвердые материалы / И. Н. Францевич, Г. Г. Гнесин, А. В. Курдюмов и др. Под общ. Ред. Францевича И.Н. – К.: Наук. думка, 1980. – 296 с.
2. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / Редкол. Н.В. Новиков (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – 280 с.
3. Hitoshi S., Irifune T. Formation mechanism and some properties of superhard nanopolycrystalline diamond synthesized by direct conversion sintering // J. Jap. Soc. of Powder and Powder Metallurgy. – 2006. – **53**, N 5. – P. 452–458.
4. Соколов А. Н., Шульженко А. А., Гаргин В. Г. Сверхтвердый наноалмазный композит инструментального назначения // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2006. – 50, № 1. – С. 50–53.
5. Заявка на патент 20030230232 США, МКИ С30В 007/00; С23С 016/27; С30В 021/02; С30В 028/06; С23С 016/00. Method of making enhanced CVD diamond / R. H. Frushour and W. Li; Заявлено 18.12.03.
6. Пат. 7115241 США, МКИ С30В 29/04, С01В 31/06. Ultrahard diamonds and method of making thereof / Russell J. H., Ho-Kwang M., Chih-shiue Y. – 10/889170; Заявлено 13.07.04; Опубл. 03.10.06.
7. Karvankova P., Veprek S. Different Approaches to Extrinsicly Superhard Materials // Proceeding of 1st International Workshop on Advanced Superhard Materials. 10–12 December 2003 / Villetaneuse, France. 2003. CD-ROM. Copyright 2003 LPMTM-CNRS, www-lpmtm.univ-paris13.fr.
8. Асланян Э. Г. Метрологическое обеспечение измерений твердости // Науч.-техн. ж. «Измерительная техника» Гос. Ком. РФ по стандартизации и метрологии. – 2005. – № 1 (<http://www.tverdomer.ru/about/scientific-publications/izmeritelnaya-tehnika-2005-1>).
9. Алмазный поликристаллический материал для оснащения бурового инструмента / А.А. Шульженко, Р.К. Богданов, В.Г. Гаргин и др. // Породоразрушающий и металло-

- обрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2007. – Вып. 10. – С. 189-196.
10. Влияние свойств микропорошков алмаза на прочность и долговечность изготовленных на их основе поликристаллических сверхтвердых материалов / М. Г. Лошак, А. А. Шульженко, Л. И. Александрова и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 174–179.
 11. Износостойкость и термостабильность алмазных поликристаллических композиционных материалов / А. А. Шульженко, А. В. Ножкина, Р. К. Богданов и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 237–242.
 12. Ральченко В. Г., Конов В. И., Леонтьев И. А. Свойства и применение поликристаллических алмазных пластин // 7-я междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России», Сб. тр. – М.: Изд-во МГУ. – 2001. – С. 246–253.
 13. Позитивне рішення по заяв. на корис. мод., № u 2008 14576 Україна. Надтвердий матеріал / О. О. Шульженко, О. М. Соколов, В. Г. Гаргін та ін. – Подана 18.12. 08; Вх. № 517695.
 14. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. – К.: Держстандарт України, 1995. – 72 с.
 15. Ральченко В. Г., Ашкинази Е. Е. Условия синтеза, абразивная и лазерная обработка поликристаллического CVD-алмаза // Инструмент. світ. – 2005. - № 3. – С. 14–18.
 16. Пат. на корис. мод., № 21897 Україна МПК СО1 В 31/06, СО1 В 31/04, СО1 В 33/025, СО4 В 35/52, СО4 В 35/573. Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі алмазу / О. О. Шульженко, В. Г. Гаргін, Н. О. Русінова. – Опубл. 10.04.07, Бюл. № 4.
 17. Центр колективного користування науковими приладами (ЦККП) «Скануюча електронна мікроскопія і мікроаналіз (СЕММА)». – <http://www.ism.kiev.ua/site/tools/russ/center2.html>.
 18. , X-Ray Tomography of Growing Silica Gel with a Density Gradient / N. G. Borisenko, A. A. Akunets, I. A. Artyukov et al. // Fusion Science and Technology – 2009. – 55, N4. – P. 477–483.
 19. Levin V.M., Petronyuk Yu.S., Ponevazh I.V. Interaction of short pulses of focused ultrasound with interfaces and planeparallel objects, in Acoustical Imaging, Vol.27, Edited by W. Arnold and S. Hirsekorn, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Dordrecht & New York, 2004. P. 69–76.
 20. Глазов В. М., Вигдорович В. Н. Микротвердость металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
 21. Поликристаллические материалы на основе алмаза / А.А. Шульженко, В.Г. Гаргин, В.А. Шишкин, А.А. Бочечка; Отв. ред. Н.В. Новиков. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
 22. Шульженко А. А., Соколов А. Н. Синтез специальных сверхтвердых материалов // Тр. Междунар. акаде. «Контенант». Рос. отде. Т. 2. Формообразование оптических поверхностей. – М.: Контенант, 2005. – С. 41–84.
 23. Elastic, mechanical, and thermal properties of nanocrystalline diamond films / J. Philip, P. Hess, T. Feygelson et. al. // J. Appl. Phys. – 2003. – 93, N 4. – P. 2172–2177.
 24. Синтез алмазов / Н. В. Новиков, Д. Д. Федосеев, Ф. А. Шульженко, Г. П. Богатырева; Под ред. Н. В. Новикова – К.: Наук. думка, 1987. – 160 с.
 25. Пат. 5667344 США, МКИ В23В 27/20, В23С 5/10, 23D 35/00. CVD diamond cutting tools with oriented crystal grain boundaries / M. A. Simpson, R. A. Hay, S. J Brox.; Заявл. 27.09.96; Опубл. 16.09.97.

Поступила 22.05.09