

УДК621.921.34:621.921.34–413:621.923.4:662.23.05:669.018.25

А. А. Шульженко, член-кор. НАН Украины; **А. Н. Соколов**, **Л. И. Александрова**,
В. Г. Гаргин, **А. С. Осипов**, **Л. Ф. Стасюк**, **А. П. Загора**, **Р. К. Богданов**, **Г. Д. Ильницкая**,
кандидаты технических наук; **М. В. Супрун**; **В. Н. Ткач**, д-р техн. наук; **Н. А. Русинова**

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

ГИБРИДНАЯ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНАЯ ПЛАСТИНА

Приведены результаты экспериментальных исследований по созданию гибридных алмазно-твердосплавных пластин (АТП) для оснащения ими бурового инструмента. Определены физико-механические свойства алмазного поликристаллического слоя АТП, армированного CVD-алмазом. Изучен характер износа алмазного поликристаллического слоя АТП.

Ключевые слова: твердость, структура, износостойкость, давление, температура, CVD-алмаз.

Введение

В настоящее время CVD-алмаз находит все большее применение как инструментальный материал. Его используют в качестве режущего инструмента для механической обработки цветных металлов и сплавов, для правки абразивных кругов и так далее. Для этих целей десятки фирм мира изготавливают пластины CVD-алмаза нескольких марок, отличающихся физико-механическими свойствами [1]. В настоящее время мы начинаем его применять для бурового инструмента, в частности, как один из составляющих элементов алмазно-твердосплавной пластины (АТП).

АТП представляет собой полученное в условиях высоких давлений и температур неразъемное соединение алмазного поликристаллического слоя, имеющего высокую износостойкость и твердость, с твердосплавной подложкой.

АТП используют для оснащения долот для бурения скважин на нефть и газ, для бурения шпуров в угольной промышленности, коронок геологоразведочного бурения и т. п. Отличительной особенностью работы АТП в инструменте по сравнению с другими поликристаллическими материалами является то, что по мере износа алмазного слоя его кромка остается острой за счет опережающего износа твердосплавной подложки (пластины) у резцов АТП. В этом случае резец длительное время сохраняет остроту за счет выступающей острой кромки поликристаллической алмазной пластины, износ которой отстает от износа твердосплавной подложки. В результате улучшается породоразрушающая эффективность пластины и увеличивается скорость бурения долота, коронки и т. п. Особенно эффективно применение АТП в долотах при бурении скважин в породах с упруго-пластичными свойствами (IV–VII категорий буримости). По сравнению с твердосплавным инструментом при использовании АТП скорость бурения возрастает в 1,5 раза, а стойкость в 5–15 раз.

Режущая кромка пластины АТП в процессе работы увеличивается, энергоемкость разрушения горной породы изменяется, так как увеличивается площадь контакта с горной породой. При этом существенно падает механическая скорость бурения. Для поддержания постоянной механической скорости бурения необходимо повышать осевую нагрузку на резец АТП, что в свою очередь увеличивает износ пластины АТП. Обычно пластины АТП размещаются в буровом инструменте под отрицательным углом резания 15–20°, соответственно высота выступа режущей кромки пластины АТП над корпусом бурового инструмента (или его лопасти), в основном будет зависеть от высоты твердосплавной подложки. Как показывает практика использования бурового инструмента, оснащенного АТП, его отработку ведут до

полного износа выступающей над корпусом инструмента части АТП с твердосплавной подложкой. Пластина АТП при этом изнашивается на 1/3 диаметра, а износ отдельных пластин АТП полностью повторяет контур износа рабочей поверхности бурового инструмента.

Для уменьшения износа режущей кромки АТП была предложена конструкция гибридной АТП (рис. 1), в которой благодаря выбору компонентов алмазного слоя с различной твердостью и трещиностойкостью и их расположения в поликристаллическом слое обеспечивается повышение ее износостойкости и скорости бурения [1].

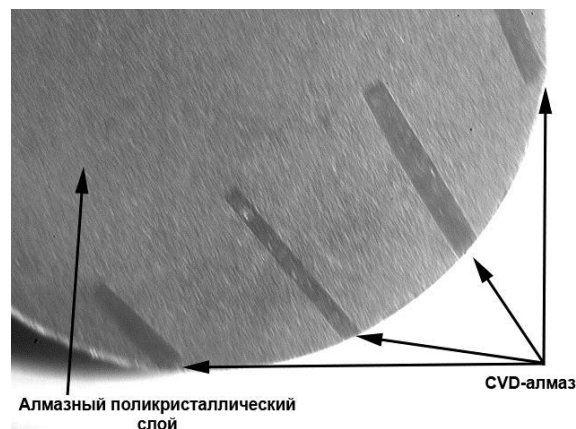


Рис. 1. Гибридная алмазно-твердосплавная пластина

Как видно из рис. 1, в гибридной АТП поликристаллический алмазный слой дополнительно содержит гнезда, в которых расположены пластины из CVD-алмаза.

Целью настоящей работы является исследование физико-механических свойств (твердости, трещиностойкости, износостойкости) алмазного поликристаллического слоя АТП и CVD-алмаза.

Материалы и методы исследований

Объектом исследований в данной работе являлась гибридная алмазно-твердосплавная пластина и ее составляющие (CVD-алмаз и поликристаллический алмазный слой). Для армирования поликристаллического алмазного слоя АТП применяли пластины CVD-алмаза с размерами 0,5×0,5×4,0 мм и 0,3×1,0×4,0 мм.

Для исследований использовали четыре разновидности CVD-алмаза (условные обозначения D1, D2, D3, D4), отличающихся друг от друга размером зерен, структурой и режимами изготовления.

В качестве исходного материала для алмазного поликристаллического слоя использовали алмазные микропорошки марки АСМ 60/40.

Спекание гибридных алмазно-твердосплавных пластин осуществляли в аппарате высокого давления типа «тороид» при давлении 7,7 ГПа и температуре ~1800 °С.

Структуру и ориентацию зерен в CVD-алмазе оценивали на основе анализа дифракции обратно-рассеянных электронов (Electron Backscatter Diffraction – EBSD), полученной с использованием комплекса HKL CANNEL 5 (фирма «Oxford Instruments»).

Твердость гибридной алмазно-твердосплавной пластины, спеченной в условиях высоких давлений и температур определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3 с использованием в качестве индентора алмазной пирамиды Виккерса. Величину твердости определяли по общепринятой формуле $HV=1,8544 \times P/d^2$, где P – нагрузка на индентор; d – среднее арифметическое двух диагоналей отпечатка [2]. Замеры твердости производили при нагрузке на индентор 4,9 Н. Величину диагоналей отпечатка замеряли с помощью оптического микроскопа «Неофот» при увеличении ×800.

Обычные методы определения трещиностойкости K_{1C} (двойное кручение, внецентровое растяжение, изгиб образца с исходной трещиной) являются неэффективными при испытании сверхтвердых материалов (СТМ). Это связано с тем, что в материалах с ковалентными связями и высоким барьером Пайерлса, к которым относятся СТМ, движение дислокаций при комнатной температуре крайне затруднено, что вызывает их высокую чувствительность к надрезам, сколам, включениям, трещинам и другим концентраторам напряжения.

В этой связи для определения трещиностойкости ковалентных материалов была разработана методика, основанная на вдавливании индентора Виккерса в плоскую поверхность хрупкого тела при нагрузках, приводящих к развитию радиальных трещин из углов отпечатка. Изменение длины трещин, образующихся у отпечатков при нагрузке 50–100 Н и проходящих как продление диагоналей отпечатка, и длины диагоналей самого отпечатка позволяет оценить трещиностойкость материала по формуле Палмквиста:

$$K_{1C} = 0,09 \times P / C^{3/2},$$

где P – нагрузка на индентор; $C = (2C_x + 2C_y) / 4$, $2C_x$, $2C_y$ – сумма длин трещин и диагонали отпечатка по соответствующей оси. Коэффициент 0,09 был принят как постоянная величина для всех испытываемых материалов.

В данной работе использовали усовершенствованный в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины вариант описанной выше методики. Особенностью методики является повышенная точность выявления трещин вокруг отпечатка.

Износостойкость определялась при точении коростышевского гранита XI категории буримости на токарно-винторезном станке модели ДИП-200. Параметры режима резания были следующие: скорость – 355 мин⁻¹, глубина резания – 0,5 мм.

Влияние вставок CVD, размещенных в рабочем торце алмазного слоя элемента АТП, на характер разрушения твердых горных пород оценивали на основе изучения размера зерен шлама, образовавшихся при разрушении породы этими вставками.

Для сравнительной оценки эффективности разрушения твердых горных пород были изготовлены элементы АТП, рабочий торец алмазного слоя которых оснащался вставками CVD-алмаза, и без них.

Сбор шлама проводился при продольном точении коростышевского гранита XI категории буримости, на токарно-винторезном станке модели ДИП-200. При этом использовалось специальное приспособление для закрепления испытуемого образца породоразрушающего элемента в виде резца с передним углом резания 15°, что соответствует установке и наиболее эффективной работе резца АТП в буровой коронке. Получаемый при разрушении гранита с заданной глубиной внедрения резца шлам собирался вместе с промывочной жидкостью в емкость, где в дальнейшем проходил процесс осаждения.

Крупность шлама гранита оценивали ситовым методом с набором сит диаметром 120 мм с поддоном и крышкой, с сетками по ГОСТ 6613-86. При этом раз мер ячеек сит был от 200 до 40 мкм, позволяющий проводить разделение шлама по фракциям от +200 до -40 мкм.

Результаты исследований

Исследованиями структуры образцов CVD-алмаза установлено следующее.

Отличительной особенностью CVD-алмаза D1 является столбчатая однородная структура (рис. 2, а) с явно выраженным кристаллическим строением (рис. 2, б). Светлые полосы, хорошо наблюдаемые со стороны реза пластины (рис. 2, в) указывают на то, что при процессе выращивания используют метод термоциклирования.

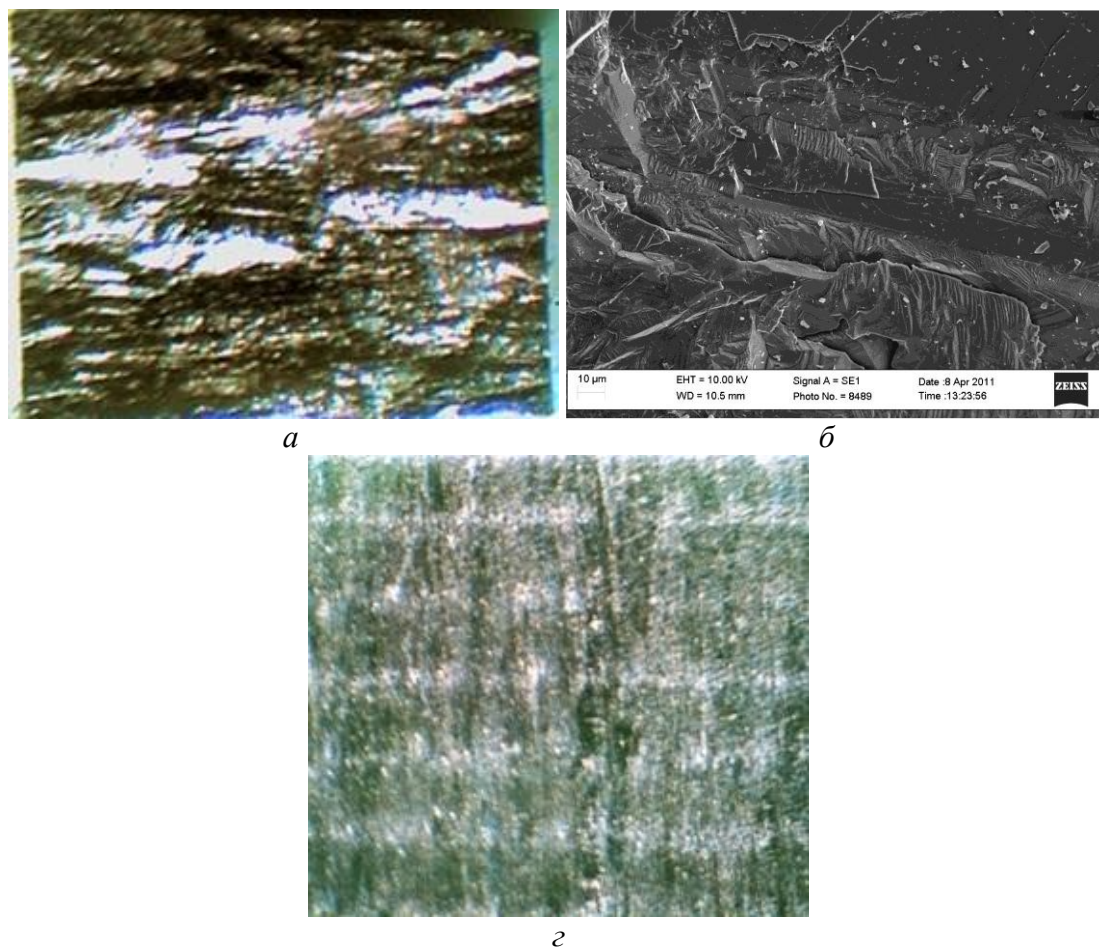


Рис. 2. Внешний вид образца CVD D1 (а – излом; б – со стороны реза пластины) и его изображение во вторичных электронах (г)

На рис. 3 показаны изображения во вторичных электронах исследуемых участков образцов D2–D4.

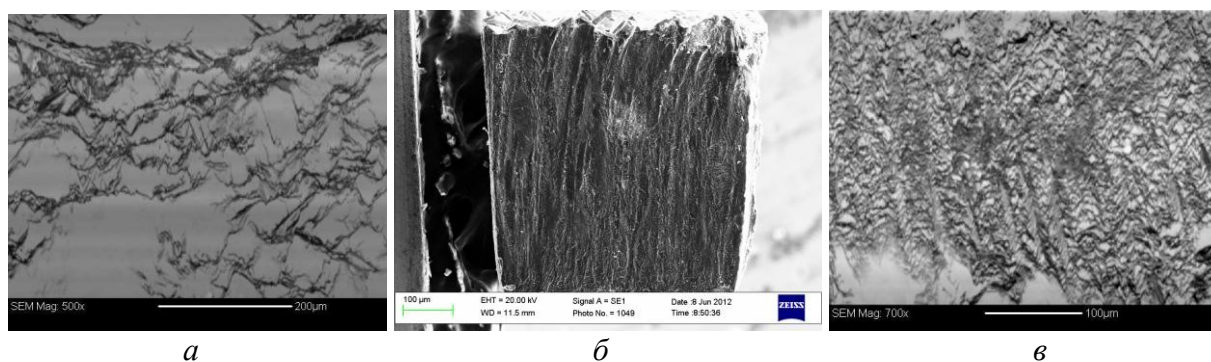


Рис. 3. Изображения во вторичных электронах исследуемых участков образцов CVD-алмаза: а – D2; б – D3; в – D4

Как видно из рис. 3 образцы D2–D4 существенно различаются по своему кристаллическому строению. Детальную информацию о различии в структуре этих образцов дает метод EBSD (рис. 4 и 5).

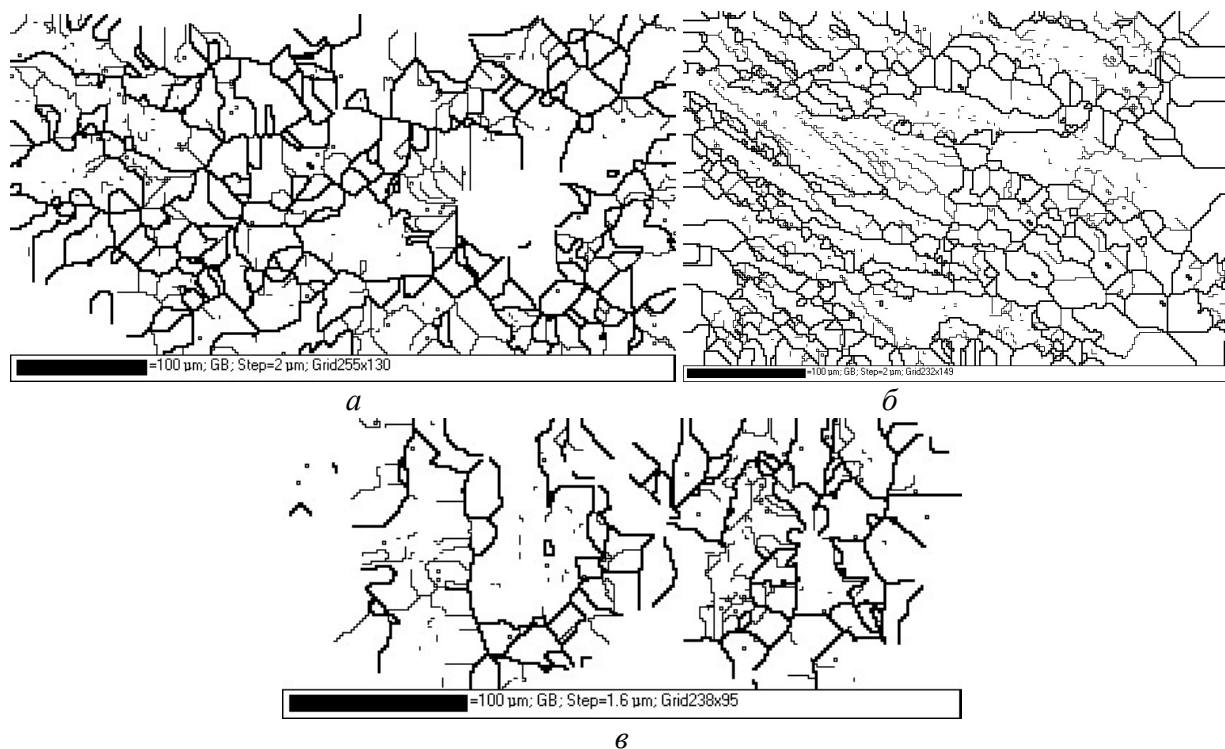


Рис. 4. Размеры и форма зерен CVD-алмаза: а – D2; б – D3; в – D4

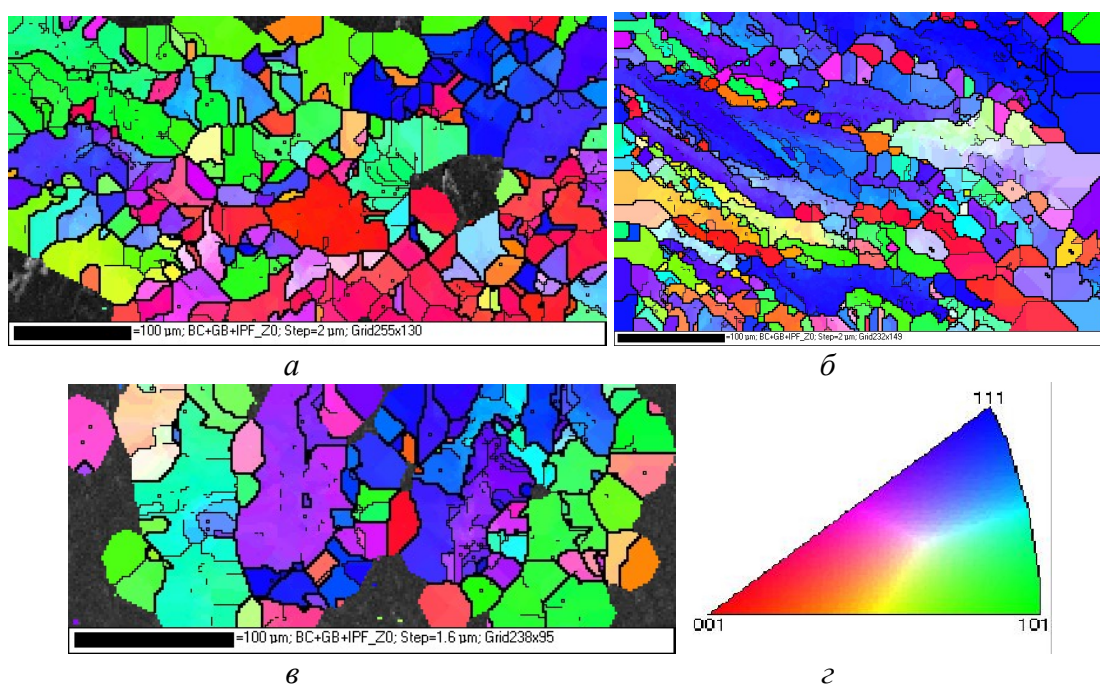


Рис. 5. Кристаллографическая ориентация зерен в образцах CVD-алмаза (а – D2; б – D3; в – D4) и диаграмма соответствия цвета и кристаллографического направления (г)

Как следует из приведенных выше рисунков, образец D2 в основном состоит из мелких зерен ($\sim 10\text{--}30$ мкм), встречаются также крупные зерна размером 100 и более. Характерной особенностью образца D3 является столбчатая структура с ориентацией в основном в плоскости (111). В образце встречаются зерна размером менее 5 мкм. Для образца D4 характерна крупнозернистая структура ($\sim 20\text{--}120$ мкм).

Все четыре образца CVD-алмаза были испытаны при точении коростышевского гранита XI категории по буримости (табл. 1).

Таблица 1. Испытание на износостойкость при точении коростышевского гранита XI категории образцов CVD-алмаза

Образец	Средняя интенсивность изнашивания по массе, мг/км
D1	0,18
D2	0,43
D3	0,17
D4	0,41

Из табл. 1 следует, что наиболее износостойкими материалами являются пластины CVD-алмаза, имеющие явно выраженную столбчатую структуру.

Поэтому в дальнейшем для изготовления гибридной АТП использовали пластины CVD-алмаза с явно выраженной столбчатой структурой.

На рис. 6 показан алмазный поликристаллический слой АТП, армированный CVD-алмазом, размером 0,3×1,0×4,0 мм. Пластина CVD-алмаза была ориентирована в алмазном слое как боковой стороной (1), так и зародышевой стороной (2). Ширина зародышевой стороны составляла 1,0 мм, а боковой – 0,3 мм.

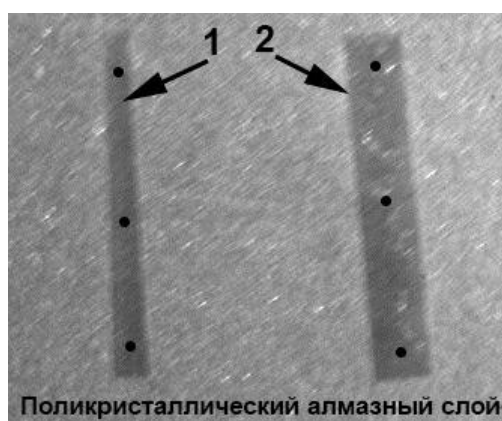


Рис. 6. Алмазный поликристаллический слой АТП, армированный CVD-алмазом: 1 – CVD-алмаз, ориентированный боковой стороной; 2 – CVD-алмаз, ориентированный зародышевой стороной

Твердость определяли в точках, отмеченных на рис. 6 черными кружками. Установлено, что значение твердости по длине пластины изменяется незначительно и составляет при ориентации боковой стороной 88–92 ГПа, а при ориентации зародышевой стороной – 105–112 ГПа.

Исходная твердость пластины CVD-алмаза, измеренная на зародышевой стороне (до спекания) составила 77 ГПа, следовательно, твердость CVD-алмаза после спекания в алмазном слое в условиях НРНТ увеличилась на 32–45%.

Твердость алмазного поликристаллического слоя в различных областях АТП составила 51–60 ГПа, трещиностойкость – 9–10 МПа·м^{1/2}.

Трещиностойкость CVD-алмаза установить не удалось, так как при нагрузке на индентор 50 Н пластина разрушалась.

Интенсивность изнашивания (износостойкость) АТП, армированной пластинами CVD-алмаза и без них была практически одинакова и составила при пути резания 2 км соответственно 0,12 и 0,13 мг/км.

Характер износа алмазного слоя гибридной АТП показан на рис. 7.

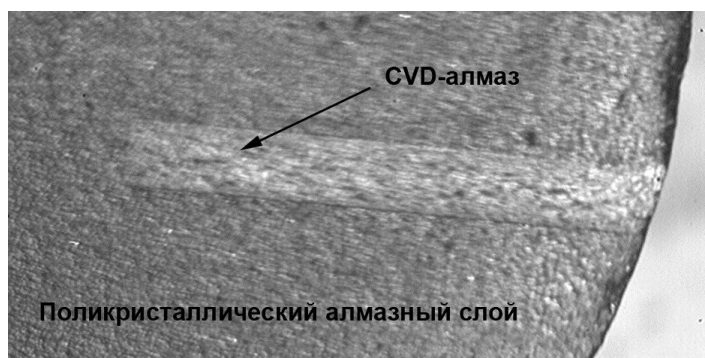


Рис. 7. Характер износа алмазного слоя АТП, армированного пластинами CVD-алмаза (0,5×0,5×4,0 мм)

Как видно из рис. 7, пластины CVD-алмаза, размером 0,5×0,5×4,0 мм, практически не изнашивались. Следы износа заметны только на алмазном поликристаллическом слое (справа и слева от пластины CVD-алмаза).

Влияние армирования алмазного слоя пластинами CVD-алмаза можно определить по изучению размера зерен шлама, образовавшегося при разрушении породы алмазотвердосплавными пластинами.

Результаты рассева шлама горной породы АТП, рабочий торец алмазного слоя которых оснащался пластинами CVD-алмаза, и без оснащения, представлен в таблице.

Таблица 2. Результаты рассева шлама гранита по фракциям

Зернистость частиц шлама, мкм	АТП	Гибридная АТП	Изменение размера частиц породы в шламе при точении гранита гибридной АТП, кол-во раз
	Содержание частиц в шламе, %	Содержание частиц в шламе, %	
+250	0,58	0,93	1,6
250/200	0,05	0,06	1,2
200/160	0,05	0,06	1,2
160/125	0,06	0,07	1,2
125/100	0,63	0,70	1,1
100/80	1,90	2,10	1,1
80/63	5,46	5,39	1,0
63/50	7,65	8,42	1,1
50/40	17,63	19,87	1,1
-40	65,99	62,40	0,9
Всего	100	100	

Как видно, при разрушении гранита элементами АТП с разным вариантом оснащения рабочего торца основной размер частиц шлама составляют зерна меньше 40 мкм. На их долю приходится от 62,40% до 65,99% от всего объема шлама.

При разрушении породы элементами гибридной АТП шлам в диапазоне +240 мкм до 50/40 мкм в процентном соотношении более крупный, чем шлам, полученный при разрушении породы элементами АТП.

С уменьшением раз мера частиц имеет место тенденция постепенного уравнивания их процентного содержания в шламе, полученном как от разрушения породы АТП, рабочий торец алмазного слоя которых оснащался пластинами CVD-алмаза, так и без оснащения.

Согласно ранее выполненным исследованиям установлено, что увеличение размеров частиц шлама при бурении сопровождается уменьшением работы, затрачиваемой на разрушение породы [3]. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о более эффективном разрушении породы элементами гибридной АТП, так как при этом происходит отделение от породы в большем объеме частиц шлама более крупного размера.

Сравнительные испытания на износостойкость гибридных АТП, армированных CVD-алмазом размером 0,5×0,5×4,0 мм и размером 0,3×1,0×4,0 мм, показали, что использование пластин CVD-алмаза толщиной 0,3 мм приводит к резкому снижению износостойкости за счет скалывания пластин CVD-алмаза в процессе испытаний (рис. 8).

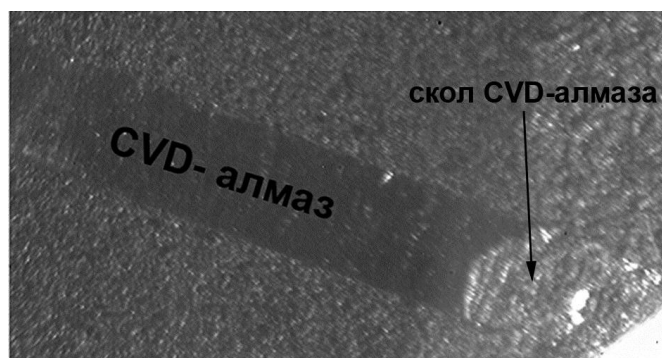


Рис. 8. Характер износа алмазного слоя АТП, армированного CVD-алмазом (0,3×1,0×4,0 мм)

Таким образом, как видно из приведенных выше экспериментальных данных, износостойкость пластин CVD-алмаза в алмазном поликристаллическом слое АТП зависит не только от геометрических размеров пластины, но в большей мере от ее структуры и физико-механических свойств, а также от свойств алмазного поликристаллического слоя.

Выводы

1. Установлено увеличение твердости на 32-45% в CVD-алмазе в гибридной алмазно-твердосплавной пластине, расположенной в поликристаллическом алмазном слое, сформированном в процессе спекания АТП ($P \sim 7-8$ ГПа, $T \sim 1800^\circ\text{C}$).

2. Определен характер износа алмазного слоя АТП, армированного пластинами CVD-алмаза размером 0,5×0,5×4,0мм. Показано, что пластины CVD-алмаза (при пути резания 2 км) практически не изнашивались, а следы износа зафиксированы только в алмазном поликристаллическом слое (справа и слева от пластины CVD-алмаза).

3. Измерение размеров частиц шлама при разрушении породы пластина АТП, армированной CVD-алмазом, показало, что шлам состоит из более крупных частиц, чем шлам, полученный от породы пластинами АТП, неармированных CVD-алмазом, что свидетельствует о более эффективном разрушении породы.

4. Для армирования алмазно-поликристаллического слоя АТП, пластинами CVD-алмаза, рекомендован CVD-алмаз, характеризующийся явно выраженной столбчатой структурой.

Наведено результати експериментальних досліджень по створенню гібридних алмазно-твердосплавних пластин для оснащення ними бурового інструменту. Визначено фізико-механічні властивості алмазного полікристалічного шару АТП, армованого CVD-алмазом. Вивчено характер зносу алмазного полікристалічного шару АТП.

Ключові слова: твердість, структура, зносостійкість, тиск, температура, CVD-алмаз.

The results of experimental studies on the creation of hybrid diamond-carbide inserts for tipping in drilling tools are shown. Physical and mechanical properties of ATP polycrystalline diamond layer reinforced with CVD-diamond were defined. The wear character of ATP diamond polycrystalline layer was studied.

Key words: hardness, texture, wear resistance, pressure, temperature, CVD-diamond.

Литература

1. А. Н. Соколов, А. А. Шульженко, В. Г. Гаргин, А. В. Котко, В. П. Брикса, Р. К. Богданов, А. П. Загора, М. Г. Лошак, Л. И. Александрова. Структура и физико-механические свойства CVD-алмаза различного кристаллического совершенства в материале гибридайт // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 2. – С. 29–40.
2. Патент на корисну модель № 83326 Україна. МПК В22F 7/04 (2006.01), В22F 3/15 (2006.01). Алмазно-твердосплавна пластина // М. В. Новіков, О. О. Шульженко, В. Г. Гаргін та ін. – Опубл. 10.09.13, Бюл. № 17.
3. Глазов В. М., Вигдорович В. Н. Микротвердость металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
4. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: Монография / Р. К. Богданов, А. П. Загора, А. М. Исонкин, П. В. Зыбинский. – Донецк: Норд-пресс, 2007. – 244 с.

Поступила 26.05.14

УДК 621.921.34-022.513.2:539.89:621.941

А. А. Бочечка, д-р техн. наук; **Н. Е. Стахнив**, канд. техн. наук; **Л. Н. Девин**, д-р техн. наук;
С. Н. Назарчук, канд. техн. наук

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

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТА АЛМАЗ – КАРБИД ВОЛЬФРАМА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

Описан процесс получения нанокompозита алмаз – карбид вольфрама. Приведены результаты исследования чистового точения сплавов алюминия инструментом, оснащенный круглой режущей вставкой из полученного материала. Установлено влияние технологических режимов обработки на составляющие силы резания, вибрацию, шероховатость и волнистость обрабатываемой поверхности. Даны практические рекомендации по выбору режимов и условий обработки.

Ключевые слова: нанокompозит алмаз – карбид вольфрама, нанопорошки, спекание при высоком давлении, чистовое точение, сплавы алюминия, режимы обработки.