

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ/INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68>

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗНОГО СЛОЯ И КОНТАКТА АЛМАЗНОГО СЛОЯ С ПОДЛОЖКОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ПЛАСТИНЫ

Научная статья

Прохоров В.М.^{1,*}, Перфилов С.А.², Поздняков А.А.³, Куржумбаев Д.⁴, Федоткин А.П.⁵

¹ ORCID : 00000-0003-1357-5746;

² ORCID : 0009-0003-8630-0636;

³ ORCID : 0009-0006-1367-6335;

⁴ ORCID : 0000-0002-5379-7346;

⁵ ORCID : 0000-0003-3822-4811;

^{1, 2, 3, 4, 5} Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (pvm[at]tisnum.ru)

Аннотация

Основным элементом бурового оборудования является фрезерное долото вращательного бурения, режущие элементы которого перемещаются по дну скважины и разрезают породу. Двухслойная алмазно-твердосплавная пластина является режущим элементом бурового долота и состоит из слоя компакта поликристаллического алмаза (Polycrystalline Diamond Compact, PDC), нанесенного на подложку из сверхтвердого сплава (WC-Co). Такой резец из алмазно-твердосплавной пластины в литературе принято называть PDC резцом. Весь PDC резец изготавливается с использованием технологии высокого давления и высокой температуры и методом пайки к буровому долоту, который, в свою очередь, называется PDC долотом.

В статье представлены результаты исследования ряда характеристик алмазного слоя и интерфейса между алмазным слоем и подложкой для PDC резцов, изготовленных по технологии ФГБНУ ТИСНУМ.

Ключевые слова: сверхтвердые материалы, поликристаллический алмазный компакт (PDC), PDC резец, интерфейс.

A CHARACTERISTIC STUDY OF THE DIAMOND LAYER AND THE CONTACT BETWEEN THE DIAMOND LAYER AND THE UNDERLYING TWO-LAYER DIAMOND-CEMENTED CARBIDE PLATE

Research article

Prokhorov V.M.^{1,*}, Perfilov S.A.², Pozdnyakov A.A.³, Kurzhumbaev D.⁴, Fedotkin A.P.⁵

¹ ORCID : 00000-0003-1357-5746;

² ORCID : 0009-0003-8630-0636;

³ ORCID : 0009-0006-1367-6335;

⁴ ORCID : 0000-0002-5379-7346;

⁵ ORCID : 0000-0003-3822-4811;

^{1, 2, 3, 4, 5} Technological Institute of Superhard and New Carbon Materials of the Kurchatov Institute National Research Center, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (pvm[at]tisnum.ru)

Abstract

The main element of drilling equipment is a rotary drilling bit, whose cutting elements move along the bottom of the well and cut through the rock. A two-layer diamond-carbide plate is the cutting element of a drill bit and consists of a layer of polycrystalline diamond compact (PDC) applied to a substrate of superhard alloy (WC-Co). Such a cutter made of a diamond-carbide plate is commonly referred to in the literature as a PDC cutter. The entire PDC cutter is manufactured using high pressure and high temperature technology and is attached to the drill bit by brazing, which in turn is called a PDC bit.

The article presents the results of a study of a number of characteristics of the diamond layer and the interface between the diamond layer and the substrate for PDC cutters manufactured using the FSBSI Technological Institute for Superhard and New Carbon Materials technology.

Keywords: superhard materials, polycrystalline diamond compact (PDC), PDC cutter, interface.

Введение

Буровое долото — это современный высокопроизводительный буровой инструмент для вращательного бурения. Корпус бурового долота оснащен PDC резцами, которые производят породоразрушающее действие, что наиболее эффективно при сверлении твердого камня. Разработка двухслойных алмазных пластин (PDC резцов) является одной из задач создания в России современного конкурентоспособного на мировом рынке отечественного производства инструмента для обрабатывающей промышленности, нефтегазодобычи и строительства [1].

PDC резцы разрабатываются и производятся с использованием новейших технологий, использующих высокие давления и высокие температуры. Они представляют собой многокомпонентную систему, которая включает в себя: а) алмазный слой из спеченного алмазного порошка, б) связующие фазы, используемые в процессе спекания режущих

PDC-элементов, и в) способ соединения алмазных элементов с корпусом инструмента. Все элементы требуют высококачественного исполнения [2], [3].

Чтобы изготовить алмазный слой (diamond table), алмазный порошок спекают с карбидом вольфрама и металлическим связующим для образования богатого алмазами слоя. Алмазные слои имеют форму пластин, и их следует делать как можно более толстыми с точки зрения конструкции, так как объем алмаза увеличивает срок службы. На практике алмазные слои имеют толщину от 2 до 4 мм, а технологические достижения позволяют увеличить их толщину. Подложки из карбида вольфрама обычно имеют высоту около 12–15 мм и ту же форму поперечного сечения и размеры, что и алмазный слой. Т. обр. PDC резец состоит из двух частей — алмазного слоя и подложки [4], [5].

Алмазный порошок и подложка из карбида вольфрама спекаются вместе при участии металлического «катализатора», которым обычно является кобальт. Он также способствует формированию прочного интерфейса, скрепляющего пластину PDC с подложкой из карбида вольфрама. Без кобальта пришлось бы применять гораздо более высокие давления и температуры для формирования компакта PDC, который сегодня не может быть применен в области массового производства. PDC резцы в процессе эксплуатации подвергаются сильному абразивно-эрзационному износу, что приводит к нагреву до высокой температуры. Однако кобальт в PDC слое имеет коэффициент теплового расширения гораздо больше, чем алмаз, и при сильном нагреве в процессе бурения разрушает PDC слой. Также при нагревании кобальт графитизирует алмаз, что сильно снижает прочность PDC резца [6].

Решающее значение для функционального качества PDC инструмента имеют износостойкость PDC резца, его термическая стабильность, теплопроводность, ударопрочность, термическая усталость, прочность и вязкость разрушения и т.п. Исследованию этих характеристик посвящено множество работ [2], [4], [6], [7]. Установлено, что термостойкость существеннейшим образом зависит от содержания кобальта в алмазном слое (теплопроводность алмаза — 2000 Вт/(м·К), теплопроводность кобальта — 60 Вт/(м·К)). Поэтому в качестве предотвращения отслоения алмазного слоя и для увеличения срока службы резца предлагается удаление кобальтового катализатора из алмазного слоя на глубину не менее 100 мкм с помощью химического травления (выщелачивание кобальта) [7].

Поверхность раздела между PDC слоем и подложкой из WC-Co (интерфейс) является важнейшей характеристикой режущего инструмента: она не только должна обеспечивать необходимую прочность, чтобы PDC слой мог выдерживать статические и динамические сдвиговые нагрузки, которые в противном случае привели бы к расслаиванию алмазного слоя, но и служит для устранения остаточных напряжений, возникающих как внутри подложки, так и внутри PCD в результате процесса спекания. Для достижения этой цели обычной практикой является разработка специальных неплоских интерфейсов, которые увеличивают количество доступной твердосплавной поверхности, к которой может крепиться PDC слой [2], [4], [5], [6].

Полномасштабные испытания PDC резцов в PDC долотах показали, что их прочность, износостойкость и особенно термостойкость, в значительной степени определяются качеством интерфейса между PDC слоем и подложкой. Однако по исследованию характеристик и качества интерфейса между алмазным слоем и твердосплавной подложкой до настоящего времени проведено ограниченное количество работ [8], [9].

Нами проведен комплекс исследований характеристик алмазного слоя и размерных характеристик интерфейса между алмазным слоем и подложкой для PDC резцов, изготовленных по технологии ФГБНУ ТИСНУМ [10], различными (разрушающими и неразрушающими) методами. В статье представлены результаты профилометрии интерфейса, исследования размерных и структурных характеристик алмазного слоя и интерфейса, изменения твердости и упругости в зависимости от глубины выщелачивания алмазного слоя PDC резцов.

PDC-резцы, изготовленные в ФГБНУ ТИСНУМ

В PDC-резце, разработанном в ФГБНУ ТИСНУМ, пластина PDC толщиной 2–3 мм и диаметром до 18 мм («table» по общепринятой терминологии [4]) соединена с подложкой из WC-Co, образуя рабочий элемент бурового долота. PDC слой состоит из алмазного компакта с зернами размером 20–10 мкм, пропитанной связующим металлическим Со. Соотношение алмазной фракции и связующего металла, а также размер алмазных зерен варьируются в зависимости от технических характеристик. PDC резцы изготавливаются методом высокого давления и высокой температуры с использованием установки на базе многопулансонного пресса GY850 с рабочим реакционным объемом ≈ 135 см³. За один рабочий цикл в камере высокого давления синтезируется/спекается от 2 до 12 (в зависимости от типоразмера) PDC резцов. После спекания поверхности пластин PDC шлифуются и полируются до требуемых значений.

На рисунке 1 представлена фотография контейнера, в котором, в условиях высоких давления и температуры спекаются PDC резцы (а) и рабочая часть многопулансонного пресса, где происходит формирование PDC резца при давлении 5–7 ГПа и температуре 1500 °C. PDC слой и резец в целом формируется за время 5–10 минут.



Рисунок 1 - Ячейка высокого давления, в которой происходит синтез/спекание одновременно до 12 PDC резцов (а) и рабочая часть многопулансонного пресса (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.1>

Исследования характеристик алмазного слоя и интерфейса PDC резцов

3.1. Пробоподготовка

Мы провели детальное исследование профилированной поверхности раздела на ряде образцов PDC-резцов. Образцы для исследований приготавливались путем разрезания целого PDC резца на части, с помощью электроискрового метода. Для оптических измерений и профилометрии были вырезаны в вертикальном направлении пластины толщиной 4 мм (рис. 2). Резка начиналась с поверхности алмазного слоя и осуществлялась с постоянной скоростью. После резки поверхность среза была отшлифована и отполирована. На рисунке 2 показаны изображения всего PDC-резца (а) и вертикального среза в центральной части образца (б). Как видно из Рисунка 2б, интерфейс представляет собой профилированный сегмент сферической поверхности большого радиуса в виде концентрических выступов и углублений.

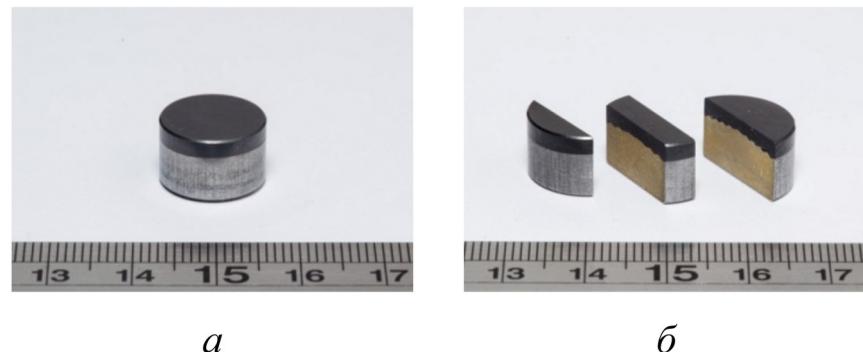


Рисунок 2 - Целый PDC резец (а) и вертикальные срезы (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.2>

Для проведения измерений твердости и модулей упругости из образцов была вырезана половина WC-подложки с сохранением алмазного слоя. Половина алмазного слоя, сохранившаяся после удаления половины подложки, была отделена от другой части образцов. Алмазная половина была затем прошлифована со стороны профилированной части, с целью удаления WC. Полученные половинки алмазного слоя образцов №1 и №2 использованы для измерений их плотности и модулей упругости. Образцы после пробоподготовки представлены на рисунке 3.

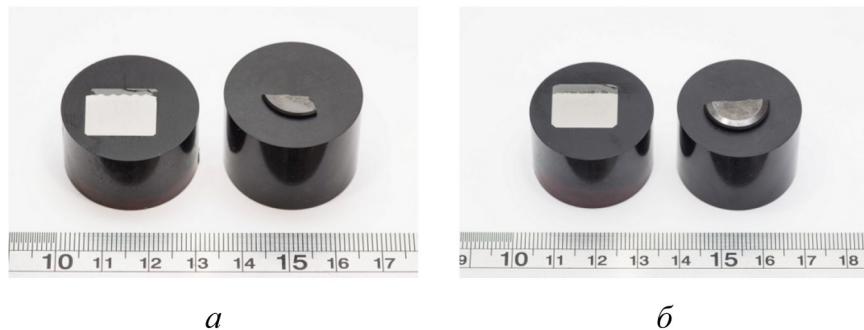


Рисунок 3 - Образцы № 1 (*a*) и № 2 (*b*) после пробоподготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.3>

Половинки с оставшимся алмазным слоем были прошлифованы и отполированы по плоскости среза для измерений следующих свойств: толщины интерфейса, размера зерна алмазного слоя, размера выщелочного слоя, твердости и модуля упругости PDC слоя.

3.2. Оптические изображения вертикального сечения PDC резцов

Оптические изображения сечений двух PDC-резцов с определением толщины интерфейса и размера алмазных зерен получали на оптическом микроскопе Olympus BX-51M. Изображения интерфейса с различными увеличениями показаны на рисунках 4 и 5. На изображениях наблюдаются дефекты в виде точечных включений, трещин и расслоений.

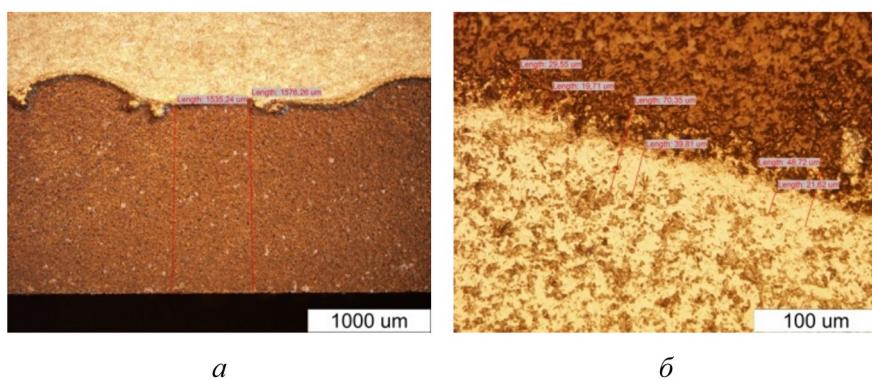
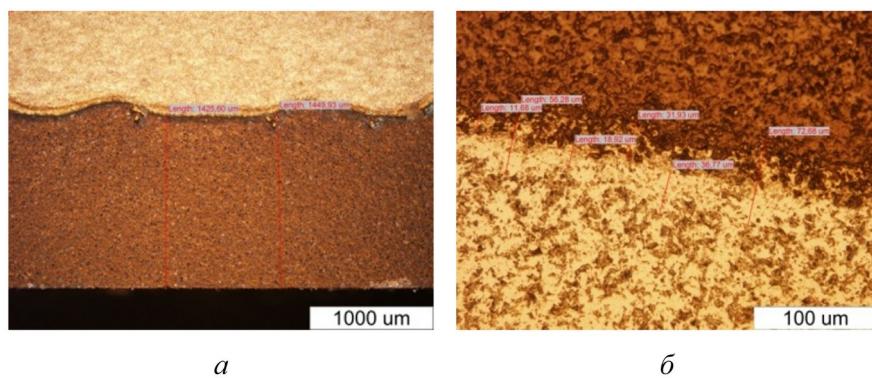


Рисунок 4 - Оптическое изображение интерфейса образца №1 PDC резца:
a - средняя толщина алмазного слоя в 1,55 мм; *б* - толщина интерфейса 44-75 мкм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.4>



На рисунке 6 представлены оптические изображения шлифа алмазного слоя с указанием размеров алмазных частиц. Характерный размер алмазных частиц составляет ~ 10 мкм. Более крупные частицы размером ~ 20 мкм состоят из сросшихся мелких исходных зерен.

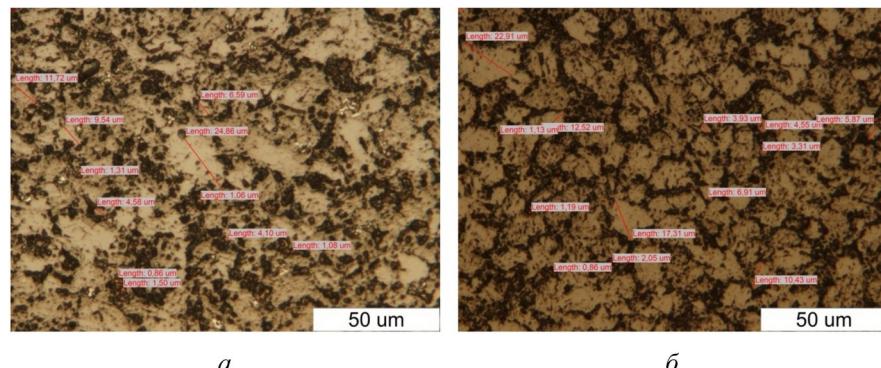


Рисунок 6 - Изображения шлифа алмазного слоя с указанием размеров алмазных частиц образца №1 (а) и №2 (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.6>

3.3. Выщелачивание

Выщелачивание кобальта из алмазного слоя PDC резцов проводили в растворе 30–40% FeCl_3 (подкисленного 2–3% концентрированной соляной или серной кислот) при 70–80°C с использованием УЗ ванны «Сапфир», с частотой ультразвукового излучения 35 кГц, 310 Вт ультразвуковой мощности.

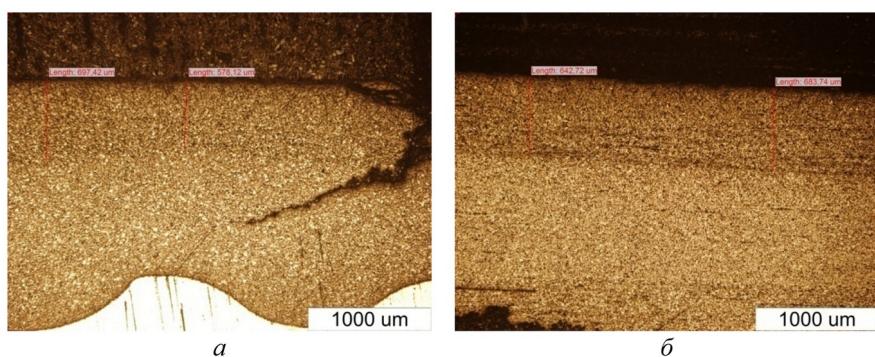


Рисунок 7 - Глубина выщелочного слоя образца № 1 (а) и образца № 2 (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.7>

Анализ рисунка 7 показал, что глубина выщелачивания для образца №1 составила 600–700 мкм, а для образца №2 650–700 мкм.

Полученные результаты свидетельствуют, что представленные резцы обладают глубиной выщелоченного слоя ~650 мкм и характерным размером алмазных частиц 5–15 мкм.

3.4. Профилометрия

Трехмерные изображения интерфейса PDC резца на поверхности среза были получены методом конфокальной оптической профилометрии с помощью оптического профилометра S Neox. Метод заключается в получении серии фотографий с сильным контрастом в фокальной плоскости измеряемого образца и их сшивании с привязкой к глубине. Изображения с высокой контрастностью и пространственным разрешением получаются за счет использования точечной апертуры, ограничивающей поток фонового рассеянного света, испускаемого из нефокусной плоскости объектива.

Размер поля полученных изображений 877x660 мкм, разрешение 1360x1024.

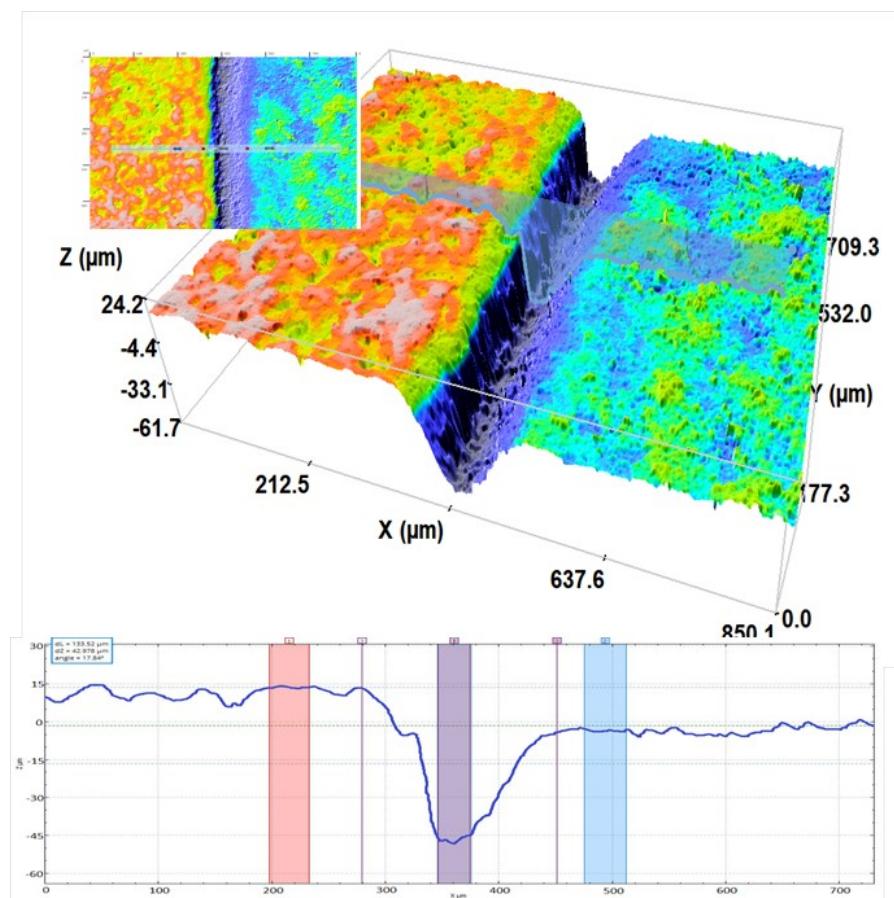


Рисунок 8 - Профилометрические изображения поверхности среза после резки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.8>

Изображение профилометра показывает, что граница раздела представлена в виде канавки глубиной около 20 мкм и шириной 140 мкм (рис.8). Это связано с тем, что при электроискровой резке с постоянной скоростью горение

материала поверхности раздела происходит более интенсивно. Можно сделать вывод, что граница раздела обладает меньшей прочностью (стойкостью), чем алмазный слой и подложка.

Изучение профилометрических изображений после полировки образца позволило определить толщину и глубину границы раздела. На рисунке 9 показан пример одного из 10 профилометрических рисунков, выполненных на двух образцах.

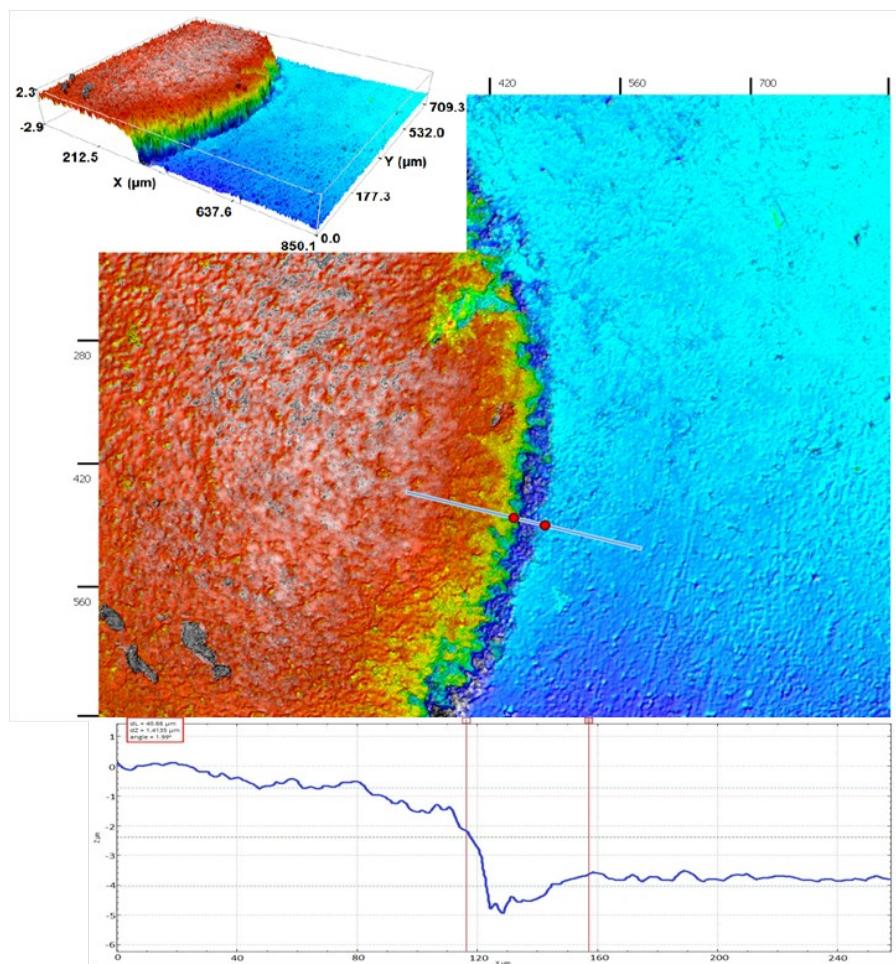


Рисунок 9 - Профилометрические изображения поверхности среза после полировки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.9>

Исследование границы раздела методом профилометрии показало, что ширина границы раздела лежит в диапазоне от 49 до 25 мкм, а глубина — от 2,0 до 1,1 мкм.

На изображениях профилометра выявлены дефекты в виде «слабых» пор, проникающих в алмазный слой.

3.5. Твердость и модуль упругости

Твердость и модуль упругости определялись при помощи сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3Д» методом индентирования.

На каждом образце проведено по 12 нагрузений с максимальной нагрузкой 0,05Н. Измерения внутри серии проводились циклически — каждый из образцов «укалывался» однократно, затем индентор перемещался к другому образцу. Такой алгоритм использовался, чтобы индентор изнашивался равномерно. Полученные данные по твердости и модулю упругости приведены в таблице 1. Образцы №3 и №4 — образцы В₄С для сравнения.

Таблица 1 - Значения твердости и модуля упругости исследованных образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.10>

| № | Твёрдость, ГПа | Модуль упругости, ГПа | Степень упругого восстановления, % |
|---|----------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 44 ± 21 | 1430 ± 850 | 64 ± 20 |
| 2 | 74 ± 36 | 1557 ± 570 | 73 ± 14 |
| 3 | 26 ± 13 | 548 ± 205 | 57 ± 21 |
| 4 | 39 ± 13 | 592 ± 271 | 68 ± 12 |

Большой разброс данных обусловлен, по-видимому, высокой шероховатостью поверхности.

На рисунке 10 показаны характерные кривые нагружения, соответствующие всем образцам, а также плавленому кварцу до (fs-1) и после (fs-2) испытаний. (Измерения на плавленом кварце проведены для контроля степени затупления иглы индентора).

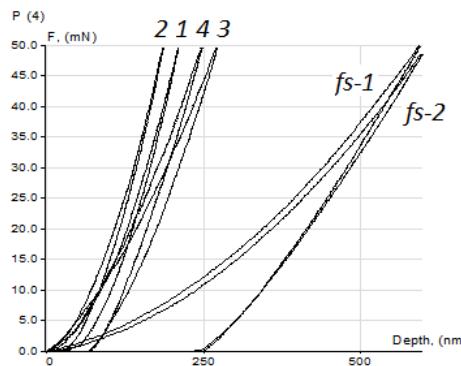


Рисунок 10 - Характерный вид кривых нагружения, полученных в большинстве испытаний всех исследованных образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.11>

На образце № 2 также были исследованы в отдельной серии (по 10 нагрузений в каждой области) 3 области: центральная (№1), наружная (№2) и ближайшая к твердому сплаву (№3) (рис. 11). Полученные данные по твердости и модулю упругости приведены в таблице 2. Отметим, что твердость в области, где был удален кобальт, значительно превышает твердость двух других областей алмазного слоя.

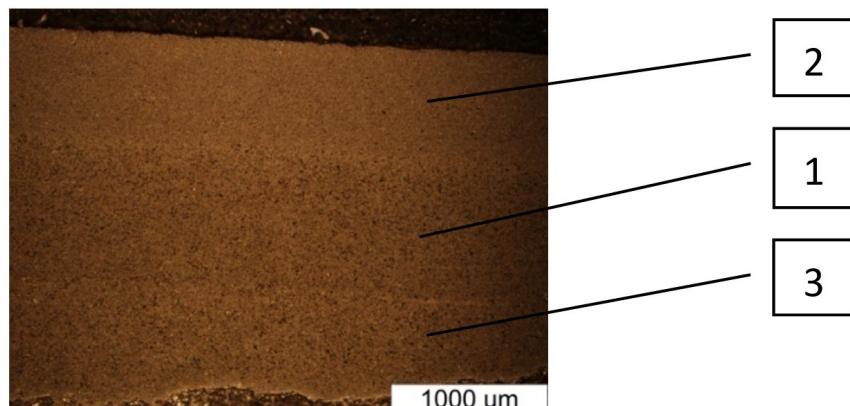


Рисунок 11 - Области измерения твердости и модуля упругости в различных областях алмазного слоя

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.12>

Таблица 2 - Значения твердости и модуля упругости в различных областях алмазного слоя образца №2

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.13>

| | Твёрдость, ГПа | Модуль упругости, ГПа | Степень упругого восстановления, % |
|------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|
| Область №1 | 73 ± 29 | 1218 ± 687 | 82 ± 12 |
| Область №2 | 84 ± 22 | 1238 ± 361 | 85 ± 9 |
| Область №3 | 64 ± 30 | 955 ± 274 | 81 ± 17 |

3.6. Упругие постоянные

Упругие постоянные были измерены с использованием ультразвукового лазерного дефектоскопа УЛД-2М. Продольные и сдвиговые ультразвуковые импульсы возбуждались с поверхности алмазной пластины лазерным лучом. Диаметр лазерного луча (оптоволокно) составлял ~1 мм. Измерения проводились в 10 точках образца и данные

усреднялись. Плотность алмазных пластин измерялась на весах KERN-770-60 с приставкой измерения плотности «Sartorius YDK 01 LP» Усредненные результаты измерения упругих постоянных представлены в таблице 3

Таблица 3 - Значения плотности, скоростей звука и упругих постоянных образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.14>

| | V _L (км/с) | V _f (км/с) | C (ГПа) | E (ГПа) | K (ГПа) | G (ГПа) | σ |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|-------|
| №1 | | | | | | | |
| ρ=3.769 (г/см ³) | 16.0 | 9.6 | 965 | 839 | 502 | 347 | 0.219 |
| №2 | | | | | | | |
| ρ=3.542 (г/см ³) | 18.0 | 10.5 | 1148 | 969 | 628 | 390 | 0.242 |

Погрешность в значениях упругих постоянных составляет ~ 20%, и она обусловлена, в основном, неплоскопарALLELНОСТЬЮ поверхности образца и его малой толщиной. Упругие характеристики и твердость образца №2 заметно превышают соответствующие значения для образца №1.

Заключение

Исследование шлифов вертикальных срезов поверхности раздела двухслойной пластины PDC/WC-Со позволило определить толщину интерфейса и выявить наличие дефектов в слое PDC. Эти дефекты, как правило, имеют вид пор размером до 50 мкм. Полученные результаты свидетельствуют, что алмазные слои представленных PDC резцов имеют глубину выщелоченного слоя 600–700 мкм и характерный размер алмазных частиц ~10 мкм. В образце №2 выщелоченный слой более равномерный и он обладает большими значениями твердости и модулей упругости.

Для экспресс-анализа интерфейса изготовленных партий PDC резцов и выявления их дефектности необходимо использовать неразрушающие методы, такие как сканирующая акустическая микроскопия и ультразвуковая дефектоскопия. Этим исследованиям будут посвящены дальнейшие работы.

Финансирование

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов» НИЦ «Курчатовский институт» - ТИСНУМ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Жидик Ю., Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.15>

Funding

The work was done using the Shared Research Facilities “Research of Nanostructured, Carbon and Superhard Materials” NRC “Kurchatov Institute” — TISNCM.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Zhidik Y., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.68.15>

Список литературы / References

1. Воробьева М.В. Новые возможности породоразрушающих инструментов, оснащенных алмазно-твердосплавными режущими элементами / М.В. Воробьева, С.А. Перфилов, А.А. Поздняков [и др.] // Вопр. Материаловедения. — 2020. — № 1 (101). — С. 74–85. — DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-74-84.
2. Wise J.L. Effects of Design and Processing Parameters on Performance of PDC Drag Cutters for Hard-Rock Drilling / J.L. Wise, D.W. Raymond, C.H. Cooley [et al.] // Transactions-Geothermal Resources Council. — 2002. — P. 201–206.
3. Hareland G. Cutting Efficiency of a Single PDC Cutter on Hard Rock / G. Hareland, R. Nygaard, W. Yan [et al.] // J. Can. Pet. Technol. — 2009. — № 6. — P. 60–65. — DOI: 10.2118/09-06-60.
4. Bellin F. The current state of PDC bit technology / F. Bellin, A. Dourfaye, M. Thigpen // World Oil. — 2010. — P. 231.
5. Бугаков В.И. Технология изготовления буровых долот при высоких давлениях и температурах с применением новых алмазных материалов / В.И. Бугаков, А.И. Лаптев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2017. — № 1. — С. 36–42. — DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-36-42.
6. Куфтырев Р.Ю. Методика испытаний алмазно-твердосплавных PCD-композитов, применяемых для оснащения PDC буровых долот / Р.Ю. Куфтырев, О.С. Котельникова, А.И. Лаптев [и др.] // Цветные металлы. — 2017. — № 11. — С. 92–96. — DOI: 10.17580/tsm.2017.11.15. — EDN: ZXPKJ.
7. Zacny K. Fracture and fatigue of polycrystalline-diamond compacts / K. Zacny // Soc. Petrol. Eng. — 2019. — № 27 (1). — P. 145–157. — DOI: 10.2118/150001-PA.
8. Prokhorov V. Development and research of characteristics of layer two-diamond plates for drilling tools / V. Prokhorov, A. Pozdnyakov, K. Kravchuk [et al.] // Machines, Technologies, Materials. — 2019. — № 7. — P. 294–297.

9. García-Marro F. Contact damage and residual strength in polycrystalline diamond (PCD) / F. García-Marro, A. Mestra, V. Kanyanta [et al.] // Diamond and Rel. Mater. — 2016. — № 65. — P. 131–136. — DOI: 10.1016/j.diamond.2016.03.004.
10. Алмазно-твердосплавные пластины (АТП). ТУ 3970-001-48786949-2017 / Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов. — 2017. — Рег. № 219.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vorobyeva M.V. Novye vozmozhnosti porodorazrushajushhih instrumentov, osnashhennyh almazno-tverdospalvnyimi rezhushhimi jelementami [New possibilities of rock-breaking tools equipped with diamond-carbide cutting elements] / M.V. Vorobyeva, S.A. Perfilov, A.A. Pozdnyakov [et al.] // Vopr. Materialovedenija [Questions of Materials Science]. — 2020. — № 1 (101). — P. 74–85. — DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-74-84. [in Russian]
2. Wise J.L. Effects of Design and Processing Parameters on Performance of PDC Drag Cutters for Hard-Rock Drilling / J.L. Wise, D.W. Raymond, C.H. Cooley [et al.] // Transactions-Geothermal Resources Council. — 2002. — P. 201–206.
3. Hareland G. Cutting Efficiency of a Single PDC Cutter on Hard Rock / G. Hareland, R. Nygaard, W. Yan [et al.] // J. Can. Pet. Technol. — 2009. — № 6. — P. 60–65. — DOI: 10.2118/09-06-60.
4. Bellin F. The current state of PDC bit technology / F. Bellin, A. Dourfaye, M. Thigpen // World Oil. — 2010. — P. 231.
5. Bugakov V.I. Tehnologija izgotovlenija burovyh dolot pri vysokih davlenijah i temperaturah s primeneniem novykh almaznyh materialov [Manufacturing technology of drill bits under high pressure and temperature with the application of new diamond materials] / V.I. Bugakov, A.I. Laptev // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija [News of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy]. — 2017. — № 1. — P. 36–42. — DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-36-42. [in Russian]
6. Kuftyrev R.Yu. Metodika ispytanij almazno-tverdospalvnyh PCD-kompozitov, primenjaemyh dlja osnashhenija PDC burovyh dolot [Test method for diamond-hardmetal pdc composites used to equip the pdc drill bits] / R.Yu. Kuftyrev, O.S. Kotelnikova, A.I. Laptev [et al.] // Cvetnye metally [Non-ferrous metals]. — 2017. — № 11. — P. 92–96. — DOI: 10.17580/tsm.2017.11.15. — EDN: ZXPWKJ. [in Russian]
7. Zacny K. Fracture and fatigue of polycrystalline-diamond compacts / K. Zacny // Soc. Petrol. Eng. — 2019. — № 27 (1). — P. 145–157. — DOI: 10.2118/150001-PA.
8. Prokhorov V. Development and research of characteristics of layer two-diamond plates for drilling tools / V. Prokhorov, A. Pozdnyakov, K. Kravchuk [et al.] // Machines, Technologies, Materials. — 2019. — № 7. — P. 294–297.
9. García-Marro F. Contact damage and residual strength in polycrystalline diamond (PCD) / F. García-Marro, A. Mestra, V. Kanyanta [et al.] // Diamond and Rel. Mater. — 2016. — № 65. — P. 131–136. — DOI: 10.1016/j.diamond.2016.03.004.
10. Алмазно-твердосплавные пластины (АТП). ТУ 3970-001-48786949-2017 [Diamond-carbide plates (ATP) /TU 3970-001-48786949-2017] / Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials. — 2017. — Reg. № 219. [in Russian]