

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ БУРОВЫХ ДОЛОТ. 1. СВОЙСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАССМАТРИВАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

<sup>1</sup>Н.А.Бондаренко, <sup>2</sup>А.Н.Жуковский, <sup>1</sup>В.А.Мечник

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины,  
Киев, ул. Автозаводская, 2, тел. (044) 4675625, e-mail: bond@ism.kiev.ua

<sup>2</sup>Институт математики НАН Украины,  
Киев, ул. Терещенковская, 3, тел. (044) 2346322

*Исследованы структурное состояние и основные свойства буровых вставок составов алмаз-твердый сплав ВК6 и алмаз-твердый сплав ВК6 с добавками CrB<sub>2</sub> – W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>, полученных методом горячего прессования. Показано, что износ композитов обусловлен сочетанием целого ряда факторов – химическим составом и предысторией входящих веществ, прочностью контакта алмаз-матрица, гомогенностью зеренной структуры, природой напряженного состояния в матрице и в окрестности алмаза, физико-химическими процессами происходящими при спекании, условиями взаимодействия рабочей поверхности с забоем скважины и формой профиля долота. Рассмотрены особенности постановки задачи износа долота с учетом специфики сверхтвердого композита и условий бурения.*

*The structure state and basic properties of the hot-pressed drilling bit inserts made of WC+6Co hard alloy matrix – diamond composite with and without CrB<sub>2</sub> – W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> additions have been investigated. It has been shown that wear of the composite is governed by a number of factors including chemistry and prehistory of components, strength of the diamond-matrix interface, homogeneity of granular structure, nature of stress state in the matrix and around the diamond grain, physical and chemical processes during the sintering, the well bottom – tool interaction conditions and the drilling bit profile. The peculiarities are considered of the drilling bit wear problem statement taking account of the specificity of super hard composites and drilling conditions.*

**1. Актуальность проблемы.** Перспектива создания буровых долот из сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов (СКАМ), совершенствование технологии, расширение областей их использования требует более глубокого исследования сущности процессов, происходящих при изнашивании и определения преобладающих факторов, влияющих на их протекание. В связи с актуальностью данной проблемы начали проводиться систематические исследования изнашивания СКАМ и инструментов на их основе с целью установления фундаментальных закономерностей данного процесса. В результате проведенных исследований было получено большое количество экспериментальных данных [1, 2]. Они весьма противоречивы и неоднозначны даже для одинаковых материалов, что явилось следствием произвольности в выборе исследователями граничных условий, силовых схем, кинематических, геометрических и других параметров процесса изнашивания. В работах [3–7] было показано, что физико-механические свойства СКАМ, применяемые для изготовления буровых долот, существенно зависят от характеристики алмазов и составляющих компонентов матрицы, химического состава, технологических режимов спекания и физикоусловий получения исходных веществ, а также химических процессов, происходящих при их изготовлении. В свою очередь износ бурового долота еще зависит от формы профиля и расположения буровых вставок на рабочей поверхности, степени их оснащённости, условий взаимодействия ин-

струмента с породой и охлаждающей средой. Вышеуказанные проблемы и определяют дальнейшую структуру представляющих работ, которые посвящены анализу основных результатов, полученных по указанным научным направлениям.

В настоящей работе проведено исследование особенностей структуры и свойств буровых вставок двух составов с целью учета основных характеристик сверхтвердых композитов и параметров бурения при построении модели изнашивания алмазного долота.

**2. Объекты и методы исследований.** В качестве изучаемых объектов взяты стандартные буровые вставки – образцы 1, применяемые для изготовления алмазных буровых долот различной конструкции и опытные – образцы 2 одинаковых размеров (диаметром 10 и высотой 10 мм). Образцы первого типа получены на основе исходной шихты состава (в мас. %) алмаз-твердый сплав ВК6, второго – алмаз-твердый сплав ВК6 с добавками CrB<sub>2</sub> – W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>. В обоих случаях концентрация алмазов зернистостью 800/630 в исходной шихте составляла 100% (4,4 карат алмазов на 1 см<sup>3</sup> шихты). Процесс спекания образцов проводили методом горячего прессования в интервале температур 300–1800 К и давлений 0,5 – 32 МПа. Данные о способе подготовки шихты на основе исходных порошков, Р–Т условиях прессования и кинетики усадки в процессе спекания приведены в работе [3].

Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) по полированным шлифам и поверхности изломов, разрушенных ударом, при комнатной температуре проводили следующие исследования:

- определяли общий элементный состав матрицы WC – Co и размеры зерен WC;
- анализировали характер распределения Co по объему образцов и в зонах, непосредственно прилегающих к частицам алмаза;
- идентифицировали механизмы разрушения образцов, т. е. устанавливали, происходит ли разрушение частиц алмаза сколом или (и) разрушение осуществляется по поверхности срастания таких частиц с матрицей;
- идентифицировали элементный состав продуктов взаимодействия, образующихся при контактировании алмаз–матрица.

Микротвердость образцов изучали на приборе ПМТ–3 с использованием индентора Викерса при нагрузке 0,49 Н. Отпечатки наносили на расстоянии 10 мкм от границы алмаз–матрица и до 50 мкм от нее. Размеры отпечатков измеряли на микроскопе NU–2E фирмы Carl Zeiss Jena при увеличении 750 в режиме фазового контраста. Испытания на износостойкость образцов проводили на специальном стенде при шлифовании кварцевого песчаника при вертикальной нагрузке 50 кГ на образце, линейной скорости вращения 4 м/с в течение 600 с. Оценку интенсивности изнашивания проводили путем отношения потери массы образца к пути трения.

**3. Общие характеристики и свойства СКМ.** Как выяснилось из полученных нами экспериментальных данных, в ямках отрыва и на поверхности оторвавшихся частиц алмаза, что характерно для образцов 1 с низкой способностью алмазоудержания, в большинстве случаев имеется повышенное содержание углерода, в том числе и в свободном состоянии в виде отдельных изолированных частиц (рис. 1, б), а также в виде тонких пластинок сильно разупорядоченного графита (рис. 1, а) и осадков с особой направленной микропластинчатой субструктурой (рис. 1, в). Оказалось, что ключевую роль на формирование свободного углерода в структуре образца 1 сыграли химические реакции, протекающие в системе WC – ( $\gamma$ ) – C (где  $\gamma$  – твердый раствор углерода и вольфрама в кобальте). В [8–10] также отмечается, что в этом случае возможно образование тройной эвтектики состава ( $\gamma$  + WC + графит). Характерной особенностью образцов 2 является отсутствие графита как в продуктах взаимодействия алмаз–матрица, так и в матрице вдали от этой зоны. Особенность распределения углерода в матрице состоит в том, что на спектрах интенсивности рентгеновского излучения его пики совпадают с пиками хрома, а в слое взаимодействия – как с пиками хрома, так и вольфрама. Такое действие проявляется образованием твердого раствора хрома в кобальте в первом случае, во втором – в виде сложных карби-

дов в системе WC – Cr – Co, что и предотвращает образованию сегрегаций свободного углерода как в матрице, так и на контакте алмаз–матрица.

Микроструктурные исследования изломов образцов 1 и 2 на РЭМ свидетельствуют о том, что в местах контакта алмаз–матрица всегда имеется переходной слой, отличающийся от матрицы морфологией зеренной структуры (рис. 2, а, в). Толщина этого слоя не превышает 3 мкм. Практически во всех случаях, когда наблюдается отрыв частиц алмаза от матрицы, а также в местах несплошностей (каверн и микропустот) на поверхности контакта алмаз–матрица в зоне, прилегающей к алмазу (рис. 2, в), наблюдается заниженное содержание кобальта в образце 1 (рис. 2, г). При реализации скола частиц алмаза, то есть когда граница контакта алмаз–матрица является прочной (рис. 2, а), относительное содержание кобальта в такой зоне близкое или повышенное по сравнению с характерным для матрицы вдали от области контакта (рис. 2, б). Такое соотношение кобальта всегда имеет место в образце 2 в отличие от образца 1, что и способствует повышению пластичности и улучшению свойств композита. Диапазон размеров зерен карбида вольфрама в матрице существенно отличается. Для образцов 1 он составляет 3–6 мкм, а для образцов 2 – не превышает 3 мкм. Микрострук-

W

тура макроизлома частиц алмаза в образцах также отличаются. Типичные ее виды приведены на рис. 3. В образцах 1 скол обычно проходит от одного источника напряжений, находящегося на границе контакта алмаза с матрицей (рис. 3, в), а в образцах 2 – такие источники трещин формируются от перенапряжений, возникающих в объеме частиц алмаза за счет всестороннего их сжатия матрицей и соответственно наличия в ней напряжений растяжения. Поскольку в последнем случае на поверхностях разрушения алмаза формируется сильно развитый микрорельеф с высокой плотностью ступенек скола различных масштабов, то это указывает на множественное разветвление разрушающей трещины (рис. 3, а, б).

Исследования микротвердости показали, что твердость зоны матрицы вокруг алмаза образцов 2 значительно превышает аналогичные значения для образцов 1. Так, микротвердость матрицы в образце 2 на расстоянии 50 мкм от границы контакта алмаз–матрица имеет значение  $\approx 29,1$  ГПа, а на расстоянии 10 мкм от этой границы  $\approx 23,8$  ГПа. Микротвердость матрицы в образце 1 в этих зонах имела значения  $\approx 21,5$  и 13,0 ГПа соответственно. С точки зрения классической теории износа повышение микротвердости зоны матрицы вокруг алмаза от 13,0 до 23,8 ГПа является несомненным преимуществом образцов 2 по отношению к образцам 1. Так, результаты испытаний образцов на износостойкость показали, что интенсивность изнашивания этих образцов в два раза ниже анало-

Co

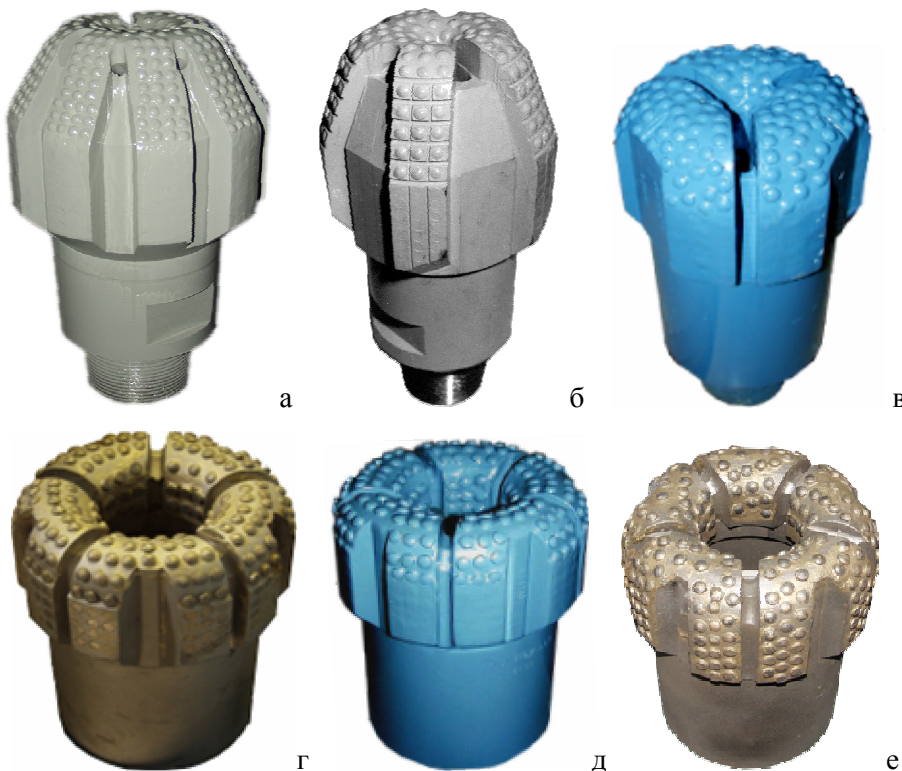
гичного параметра образцов 1. (соответственно  $767 \cdot 10^{-6}$  и  $1752 \cdot 10^{-6}$  грамм/м). Такое существенное повышение износостойкости опытных образцов обеспечивается прежде всего за счет надежного алмазоудержания. Так, после испытаний на износостойкость (при одинаковых условиях) на рабочей поверхности образца 2 выпали из матрицы только единичные частицы алмаза (рис. 4, б), в то время как в образце 1 это произошло для большинства алмазов (рис. 4, а).

Из представленных результатов следует, что большинство уникальных свойств алмаза, таких как наивысшая среди известных веществ износостойкость, твердость, теплопроводность и т. п. реализуются в СКАМ только при образовании сильных химических связей на границах контакта алмаз–матрица и особого состояния матрицы вокруг этих границ. Продолжая обсуждать причины изменения структуры и свойств СКАМ отметим следующие важные аспекты. Неравномерные контактные давления, температуры и скорости вращения (из-за специфики конструкции долот) на рабочей поверхности профиля приводит к преждевременному изнашиванию ее периферийной части и непригодности инструмента. Поэтому для учета влияния формы профиля и других конструктивных параметров при построении задачи изнашивания приведем основную классификацию бурящих инструментов.

**4. Классификация инструмента и физические аспекты рассматриваемой проблемы.** Такой инструмент характеризуется многообразием конструкций и технологических параметров. Алмазный буровой инструмент подразделяется на буровые долота, предназначенные для формирования ствола скважины сплошным забоем (рис. 5, а, б, в), бурильные головки – для формирования ствола скважины с одновременным выбуриванием из монолита горной породы цилиндрического керна (рис. 5, г, д, е), а также инструмент специального технологического назначения. Последний имеет широкий спектр применения и подразделяется на следующие: резные долота (рис. 6, а) предназначены для резки боковых стволов при кустовом бурении или в аварийных ситуациях; фрезера кольцевые (рис. 6, б) предназначены для наружного оббуривания колонны труб или других предметов с последующим извлечением их из скважины с помощью специальных технологических приемов; фрезера забойные (рис. 6, в) предназначены для разбуривания металлических остатков на забое скважины (в случае невозможности их извлечения из скважины), цементировочных пробок и т.п.; калибраторы наддолотный (рис. 6, д) и колонный (рис. 6, г) предназначены для калибровки стенок скважины с целью обеспечения заданного диаметра, а также стабилизации бурового долота относительно оси скважины и минимизации воздействия усилий со стороны буримых пород; металлоулавливатели калибраторы (рис. 6, е) предназначены для калибровки стенок скважины с одновременным отбором металлических остатков (шарики шарошечных долот, породоразрушающие вставки,

выпавшие из долот, металлическая стружка и т.п.). В зависимости от технологических параметров и прочности породы алмазный буровой инструмент разделяют на два типа:

- микрорежущего, оснащенный вставками из СКАМ славутич или твесал (рис. 5);
- режущего, оснащенные алмазно–твердосплавными пластинами (АТП) (рис. 7).



*a – ИСМ-292,2 С; б – ИСМ-214,3 МС; в – ИСМ- 214,3 Т; г – ИСМ- 214,3/80 МС; д – ИСМ- 215,9/100 С; е – ИСМ-214,3/80 С*

**Рисунок 5 — Буровой инструмент микрорежущего типа**



*a – зарезное долото, ИСМ-А – 292,2 МС; б – фрезер кольцевой, ИСМ-ФК – 112/100; в – фрезер забойный, ИСМ-ФЗ – 270; г – калибратор колонный, ИСМ-К 295,3 СТ; д – калибратор наддолотный, ИСМ-К 215,9 СТ; е – металлоуловитель калибратор ИСМ-МУК 214,3*

**Рисунок 6 — Буровой инструмент специального технологического назначения**

Породоразрушающий инструмент микро-режущего типа используется преимущественно в турбинном режиме бурения (высокооборотном 300–600 об/мин). Допускается использова-

ние такого инструмента и в роторном режиме бурения (40–142 об/мин). Преимуществом инструмента из СКММ такого типа является то, что они могут использоваться для бурения пород



Рисунок 7 — Долото режущего типа ИСМ АП-214,3МС



Рисунок 8 — Буровое долото нового поколения ИСМ-АП-165,1 С

различной твердости. Инструмент режущего типа используется как в турбинном, так и в роторном режиме бурения (рис. 7). Высокая эффективность такого инструмента обеспечивается за счет высокой механической скорости бурения. Ограничивающим фактором применения бурового инструмента режущего типа является низкая термостойкость АТП ( $650^{\circ}\text{C}$ ). В настоящее время нами разработаны АТП термостойкостью  $1000^{\circ}\text{C}$  [11], позволяющие расширить область применения долот режущего типа. На рис. 8 приведено долото нового поколения, обладающие высокой износостойкостью и производительностью при бурении различных горных пород. Важнейшую роль в эффективной эксплуатации играет профиль долота. От правильного выбора профиля зависит износостойкость инструмента [12]. Рациональные профили бурового инструмента для пород различной твердости, геометрия и конструктивные параметры, схемы промывочных каналов для подвода бурового раствора в забой скважины и основные требования к технологии бурения при-

ведены в работе [13]. Эффективное бурение охватывает целый комплекс проблем. Они требуют привлечения математических моделей механики сплошных сред: теплопроводности, термоупругости, изнашивания. К особенностям такого моделирования следует отнести следующие факторы:

1. Буровое долото имеет неоднородную структуру: теплофизические и механические свойства алмазосодержащего слоя существенно отличаются от аналогичных параметров твердосплавной матрицы.

2. Буровое долото в процессе работы охлаждается мощным потоком жидкости.

3. Сложная геометрическая форма долота и условия его контакта с забоем скважины с тепловыделением приводят к специальным граничным условиям для взаимосвязанных задач теплопроводности, термоупругости и износа..

При этом задачу теплопроводности нельзя рассматривать изолировано от забоя, ведь тепловой поток от трения распределяется как к нему, так и к долоту. В результате должна решаться нелинейная контактная задача взаимосвязанной термоупругости, когда температурные напряжения являются источником такого теплового потока. Чтобы получить аналитические решения таких задач, следует приблизить форму профиля долота к классическим (например, сферическая, полусферическая и т.д.).

4. При решении задачи изнашивания алмазного долота следует использовать модели изнашивания, определяющие зависимость скорости износа от давления на контакте, скорости относительного скольжения, температуры, механических и микрогеометрических характеристик долота.

#### Выводы

1. Показано, что структура, свойства и износ буровых вставок и инструментов на их основе существенно зависят от химического состава и состава продуктов взаимодействия, прочности контакта алмаз – матрица, напряженно-деформированного состояния в матрице в окрестности алмаза, структурно-фазового состояния матрицы, формы профиля и условий бурения.

2. Проведен анализ важнейших аспектов СКМ и буровых долот с конечной целью решения контактной задачи термоупругости при наличии износа долота сферической формы. Решение такой задачи и нахождение связи между наблюдаемыми физическими величинами будет представлено в следующих статьях.

#### Литература

1. Вовчановский И.Ф. Породоразрушающий инструмент на основе славутича для бурения глубоких скважин. – К.: Наук. думка, 1979. – 210 с.

2. Цыпин Н.В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. – К.: Наук. думка, 1983. – 260 с.

3. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Влияние диффузии и химических реакций на структуру и свойства буровых вставок. 1. Кинетическое описание систем  $C_{алмаз} - BK6$  и  $C_{алмаз} - (BK6 - CrB_2 - W_2B_5)$  // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8. – №2. – С. 99–106.
4. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Кинетика физико-химических процессов в алмазосодержащих композитах // Доповіді НАН України. – 2005. – № 2. – С. 89–93.
5. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Структура и свойства буровых вставок, спеченных методом горячего прессования // Доповіді НАН України. – 2005. № 3. – С. 93–97.
6. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Кинетические особенности влияния  $CrB_2$  на энергетическое состояние спекаемого композита состава алмаз-твердый сплав  $BK6$  // Доповіді НАН України. – 2005. – № 9. – С. 96–101.
7. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Кинетические константы и их связь со структурой и свойствами композитов состава алмаз-твердый сплав  $BK6$  // Доповіді НАН України. – 2005. – № 10. – С. 97–103.
8. Чапорова И.Н., Чернявский К.С. Структура спеченных твердых сплавов. – М.: Металлургия. 1975. – 246 с.
9. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 526 с.
10. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 328 с.
11. Алмазно-твердосплавна пластина: пат. УКРАЇНА 63469 А, МПК 7 В22, F 7/04. Бюл.(2004), № 1 / М.В.Новіков, І.Й.Рибчич, С.І.Крижанівський, М.О.Бондаренко, В.А.Мечник, О.М.Жуковський.
12. Бочковський А.М. Расчет профиля торцевой части инструментов вращательного действия // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 1. – С. 35–38.
13. Квач В.В. О классификационных признаках буровых долот ИСМ истирающего типа, оснащенных сверхтвердыми композиционными материалами // Буровой инструмент из сверхтвердых материалов: Сб. науч. трудов. – К.: ИСМ АН УССР, 1986. – С. 56–60.

УДК 662.758.2

## ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ

В.М.Мельник

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 42351  
e-mail: teplo@nung.edu.ua

Одним из важных аспектов применения сивушных масел в эквивалентном топливе является коммерческая эффективность. В расчетах коммерческой эффективности использования сивушных масел, как добавок к бензину, необходимым техническим условием взято обеспечение одинаковых октановых чисел эквивалентного топлива в сравнении с товарным бензином. В конечном результате автором были рассчитаны зависимости изменения цены используемого бензина в зависимости от процентного содержания в нем сивушных масел.

Следовательно, для принятых цен на бензины и сивушные масла из проведенных расчетов видно, что с увеличением процентного содержания сивушных масел в эквивалентном топливе достигается увеличение коммерческой эффективности за счет использования в эквивалентном топливе бензина с низким октановым числом.

Одним із способів використання сивушних масел (СМ) як добавок до бензинів є спосіб змішування їх з бензинами у певному об'ємному чи масовому співвідношенні з подальшою подачею цього еквівалентного за детонаційною стійкістю і енергоемністю палива (ЕП) в цилін-

One of important aspects of application of fusel oils in an equivalent fuel is commercial efficiency. In computations of commercial efficiency of the use of fusel oils, as additions to the petrol, by a necessary technical condition, providing of identical octane numbers of equivalent fuel is taken in comparison with a commodity petrol. In an eventual result by an author was calculated to dependence of change of cost of the used petrol depending on the percentage in him fusel oils.

Consequently, for the accepted prices on petrols and fusel oils it is visible from the conducted computations, that with the increase of percentage of fusel oils in an equivalent fuel the increase of commercial efficiency due to the use in the equivalent fuel of petrol with a low octane number is achieved.

дри двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) [1]. З метою досягнення ефективного використання ЕП в ДВЗ необхідно з'ясувати економічну ефективність їх використання і порівняти її з економічними показниками товарних бензинів.