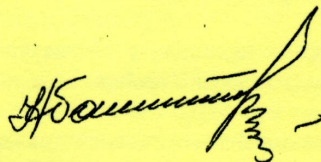


622.24.051
581

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ



Бондаренко Микола Олександрович

УДК 622.24.051;548.39;539.2

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ АЛМАЗНОГО БУРОВОГО
ІНСТРУМЕНТУ З ПІДВИЩЕНОЮ
РОБОТОЗДАТНІСТЮ

05.15.10 – Буріння свердловин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля Національної академії наук України

Науковий консультант: академік НАН України, доктор технічних наук, професор **Новіков Микола Васильович**,
Інститут надтвердих матеріалів НАН України, директор Інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Мислюк Михайло Андрійович**,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри буріння нафтових і газових свердловин, м. Івано-Франківськ



доктор технічних наук, професор **Давиденко Олександр Миколайович**,
Національний гірничий університет, завідувач кафедри техніки розвідки родовищ природних копалин,

Провідна уста

Захист відбуд
вченої ради Д
нафти і газу з

3 дисертац
Франківськ
76019, Укра

, декан фа-
аук, м. Київ

родних газів

спеціалізованої
університету
атська, 15.

іотеці Івано-
у за адресою:

Автореферат розісланий « 09 » лютого 2007 р.
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

I.M.Ковбасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найважливіших завдань, які стоять перед нафтовою промисловістю України, є забезпечення енергоносіями народного господарства. Відкриття нових родовищ нафти і газу потребує збільшення глибин буріння, а також обсягів буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин, що вимагає застосування високоефективних породоруйнівних інструментів здатних працювати при бурінні твердих, абразивних порід.

В зв'язку з вищезазначеним, створення алмазного інструменту з використанням розроблених моделей зношування доліт і спікання АТП з високою (1100 °С) термостійкістю та алмазовмісних породоруйнівних вставок, зносостійкість яких в 2 – 3 рази перевищує зносостійкість вставок, що спікаються серійно, є актуальною проблемою на сучасному етапі для теорій зношування, матеріалознавства і практики буріння нафтових свердловин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України відповідно до таких планів науково-дослідних проектів і тем, в яких автор був керівником:

1) тема 1.6.7. 0954 "Розробка методу прогнозування зносостійкості та ріжучих властивостей породоруйнівних елементів доліт на основі математичного моделювання контактної взаємодії інструменту з породою" за постановою Бюро ВФТПМ НАН України № 11 від 07.02.2002 р.;

2) тема 1.6.7. 0959 "Дослідження термомеханічної взаємодії інструменту з породою і розробка системи комп'ютерного моделювання алмазного бурового інструменту для нафтогазових свердловин" за постановою Бюро ВФТПМ НАН України № 10 від 07.06.2005 р.;

3) договір 3880 "Розробка та виготовлення доліт ріжучої дії Ø 292,9 і Ø 214,3 мм, оснащених породоруйнівними елементами нового технічного рівня для буріння порід середньої твердості".

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка наукових засад створення високоефективного алмазного бурового інструменту для буріння нафтових та газових свердловин в породах середньої твердості та верхніх інтервалах твердих порід.

Досягнення цієї мети здійснюється за рахунок вирішення таких задач:

1. Постановка та розв'язок нестационарної задачі теплопровідності для алмазного долота півсферичної форми в умовах буріння нафтових та газових свердловин. Установлення багатofакторної залежності впливу теплофізичних властивостей і мікрогеометричних характеристик алмазовмісного шару композита та технологічних режимів буріння на температурний стан долота.

2. Розробка математичної моделі для визначення термопружного стану за рахунок нерівномірного нагрівання та взаємодії робочої поверхні долота з гірською породою. Постановка та розв'язок контактної задачі термопружності за наявності зношування алмазного долота півсферичної форми в умовах буріння.

НТБ
ІФНТУНГ



as1130

3. Дослідження основних параметрів композита і умов буріння, які істотно впливають на кінетику зношування алмазного долота. Розкриття механізму та встановлення кінетичних залежностей спікання композита і умов буріння на процес зношування алмазного долота.

4. Розробка технології спікання бурових вставок нового технологічного рівня.

5. Виготовлення та впровадження у виробництво розробленого бурового інструменту.

Об'єкти дослідження:

– алмазні бурові долота ІНМ-214,3 Т, ІНМ-АП-165, 1С, ІНМ-АП-214, 3С, калібратор ІНМ-К-295, 3СТ;

– породоруйнівні елементи бурових доліт, розроблені на основі шихти алмаз – твердий сплав ВК6 за серійною технологією і елементи, розроблені на основі нової технології;

– алмазно-твердосплавні пластини для бурових доліт, виготовлені за серійною технологією і пластини, розроблені на основі запропонованого хімічного складу.

Предмети дослідження:

– розрахунок температурних полів, квазістатичних термонапружень, кінетики зношування дослідних зразків бурових вставок і алмазних доліт на їх основі, швидкості усадки та енергетичного стану при спіканні зразків бурових вставок в умовах неізотермічного експерименту;

– фазоутворення, структурний стан прошарку в матриці композита навколо алмаза і в матриці вдалині від алмаза та фізико-механічні властивості елементів бурових доліт.

Методи дослідження:

– використовували методи математичної фізики та інтегральних перетворень, метод Гальоркіна з розкладенням по власних функціях спектральних задач в рівнянні і граничній умові, теорію спеціальних функцій та різницеву схему Кранка – Нікольсона, принцип суперпозиції. Для дослідження енергетичного стану в процесі спікання зразків використовували кінетичне рівняння Йохансона – Мела – Аврамі – Єрофієва – Колмогорова для зародкоутворення нових фаз, кінетичне рівняння Яндера для дифузії, кінетичне рівняння для випадку, коли швидкість процесу контролює хімічна реакція, узагальнене рівняння для випадку, коли швидкість спікання контролюють як дифузія, так і хімічна реакція. Для визначення швидкості відносної усадки при спіканні дослідних зразків використовували кубічні сплайн-функції;

– методи растрової електронної мікроскопії (РЕМ) і просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ) з використанням методики прицільного отримання пластикових відбитків зі злому. Фазовий аналіз виконували за рентгенограмами, які знімали за допомогою дифрактометра ДРОН-2. Дослідження мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 за навантаження 4,91 Н (500 Г). Відбитки наносили на відстані 10 мкм від границі контакту алмаз – матриця і до 50 мкм від неї. Розміри відбитків

виміряли на універсальному мікроскопі NU-2E фірми Carl Zeiss Jena за збільшення 750 в режимі фазового контрасту. Оцінку інтенсивності зношування виконували стандартними методами (відношення втрати маси матеріалу, який зносився, до шляху ковзання).

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено методики для визначення теплового потоку внаслідок тертя робочої поверхні об гірську породу, силових та енергетичних параметрів при руйнуванні гірських порід породоруйнівними елементами з врахуванням специфічних особливостей НКМ та умов буріння (питома робота руйнування для вільної і примусової подачі, момент обертання, проходка на долото), термостійкості АТП.

2. Дістало подальший розвиток рішення нестационарної задачі теплопровідності для алмазного долота напівсферичної форми в умовах буріння нафтових та газових свердловин. Модель включає систему диференціальних рівнянь теплопровідності для складеного напівшару в частинних похідних, початкову умову, граничну умову спряження на границі шарів і умови теплообміну по рухомих границях. В моделі враховується нагрівання долота за рахунок руйнування породи робочою поверхнею і його охолодження шляхом конвективного теплообміну внаслідок сумісної дії природної і вимушеної конвекції в потоці охолоджуючої рідини та зміни її агрегатного стану за високих температур на робочій поверхні. Розв'язок одержано у явному вигляді, що дає змогу виконувати параметричний аналіз температурних полів долота залежно від широкого варіювання вихідних даних і пояснити причини нерівномірного розподілу температур як в алмазовмісному шарі композита, так і в долоті.

3. Вперше побудовано математичну модель для розрахунку термопружного стану алмазного бурового долота в процесі його роботи. Отримано аналітичні вирази для визначення квазістатичних температурних напружень (радіальні, дотичні і тангенціальні) від часу залежно від фізичних властивостей композита і основи долота, режимних і конструктивних параметрів з врахуванням впливу складних теплових процесів.

4. Вперше сформульовано і розв'язано задачу визначення зношування алмазного долота в умовах термопружного контакту в припущенні, що швидкість зношування лінійно залежить від швидкості відносного ковзання і тиску на контакт, а коефіцієнт зношування є функцією температури. При цьому температура функціонально зв'язує властивості композита, мікрогеометрію алмазовмісного шару, концентрацію і зернистість алмазів.

5. Вперше для виявлення феномену покращання структури і властивостей надтвердих композиційних матеріалів на основі твродсплавних матриць розроблено загальну математичну модель для опису фізико-хімічних процесів, які відбуваються при їх спіканні методом гарячого пресування в інтервалі 300 – 1800 К і тиску 0,5 – 32 МПа. Характерною рисою моделі є те, що узагальнена константа швидкості процесу спікання являє собою добуток швидкості хімічної реакції поміж вихідних речовин і модельної функції фізичної залежності двох кінетичних параметрів. При цьому

енергія активації процесу підкоряється закону Арреніуса, а модельна функція моделює одночасно як дифузійні, так і хімічні процеси

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропоновано кінетичну модель для опису фізико-хімічних процесів, які відбуваються при спіканні породоруйнівних елементів бурового інструменту.
2. На основі запропонованих моделей визначено раціональний хімічний склад породоруйнівних елементів бурових доліт та технологічні режими їх спікання, що дало змогу втричі підвищити зносостійкість бурових елементів доліт в порівнянні із стандартними елементами. (патент України № 64274, № 63468).
3. Виготовлено нові, конкурентоспроможні на світовому ринку АТП, термостійкість яких становить до 1100 °С (стандартні 650 °С), що дає змогу використовувати їх при бурінні твердих абразивних порід (патент України № 63469).
4. Створено високоефективний породоруйнівний інструмент ІНМ, який успішно використовується при бурінні нафтових і газових свердловин в абразивних породах середньої твердості та верхніх інтервалах твердих порід як в Україні, так і за її межами.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора полягає у формуванні наукового напрямку проблеми, побудові та рішенні задач нестационарної теплопровідності, термопружності і зношування алмазного долота в умовах буріння нафтових та газових свердловин та кінетики спікання НКМ на основі тврдосплавних матриць методом гарячого пресування, а також в установленні фундаментальних закономірностей даних процесів і розробці нових методів управління якістю готових виробів.

Дисертаційну роботу виконано у відділі комп'ютерного матеріалознавства надтвердих композиційних матеріалів для породоруйнівних елементів Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України під керівництвом академіка НАН України М.В. Новікова. В дисертації узагальнено результати опублікованих наукових досліджень автора, виконаних ним за період 1990 – 2006 рр., і наведені в тексті. Деякі теоретичні результати, які стосуються опису кінетики зношування бурового долота і спікання надтвердих матеріалів, було отримано сумісно з О.М. Жуковським і В.А. Мечником. Структурні дослідження матриці навколо алмаза і взаємодії вихідних речовин композита було проведено сумісно з Г.С. Олійник і О.Г. Кулик.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладених у дисертації, доповідалися автором на таких наукових з'їздах, конференціях, симпозіумах, нарадах: I – IX Міжнародні конференції "Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения" (п. Морське, Крим, Україна, 1998 – 2006 рр.); 3 конференціях "Ассоциации буровых подрядчиков России" (м. Москва, 2002 р., 2003 р., 2006 р.); Міжнародна конференція "Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике" (м. Київ, 2003 р.); Третя Міжнародна конференція "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий" (Кацивелі – Понизовка, Крим, Україна, 2004 р.); Міжнародна науко-

во-технічна конференція "Порошковая металлургия: достижения и проблемы" (м. Мінськ, 2005 р.).

Матеріали дисертації доповідались також на наукових семінарах в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України (2004 – 2006), ПІМ ім. І.Н. Францевича НАН України "Современная техническая керамика" (2005 р.) В цілому дисертаційна робота доповідалась на науковому семінарі ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ, 2006 р.) та на кафедрі буріння ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ, 2006 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено в 49 наукових працях (36 з них опубліковано в фахових виданнях), зокрема 27 – наукових журналах, 13 – збірниках наукових праць, 6 – тезах та матеріалах конференцій та у 3 патентах на винахід.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, бібліографічного опису джерел і додатків. Повний обсяг становить 320 сторінок, зокрема 95 рисунків і 31 таблиця. Бібліографічний опис джерел вміщує 230 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглянуто проблеми вдосконалення і створення бурових інструментів, підвищення їх ефективності. Проаналізовано можливість опису процесів, які відбуваються при спіканні та зношуванні породоруйнівних елементів алмаз – твердий сплав ВК6 методами механіки суцільних середовищ і хімічної кінетики та створення на їх основі конкурентоспроможних доліт для буріння нафтових та газових свердловин. Обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, обґрунтовано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про особистий внесок автора у вирішення проблеми, апробацію роботи і публікації основних результатів.

У першому розділі з урахуванням специфіки НКММ наведено детальний аналіз роботи породоруйнівного інструменту та охарактеризовано сучасний стан в теорії зношування і технології виготовлення інструментів для буріння нафтових та газових свердловин.

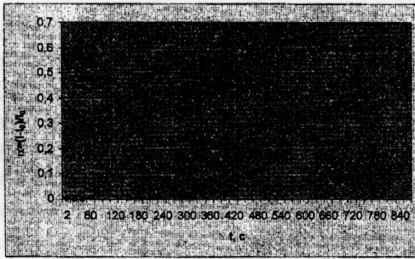
Зведено порівняльні характеристики відробки шарошкових і алмазних інструментів вітчизняного та імпортного виробництва. Вказано причини низької швидкості буріння та проходки алмазних інструментів ІНМ в порівнянні з інструментами імпортного виробництва. До цих причин в першу чергу належать низькі термостійкість алмазно-твердосплавних пластин (АТП) та зносостійкість алмазного шару бурових вставок. Досліджено термостійкість і механічні характеристики АТП залежно від хімічного складу і показано, що введення в склад алмазовмісного шару добавок SiB_2 і оптимізація умов спікання забезпечують підвищення термостійкості зразків від 650 °С до 1100 °С, що зумовлює перспективність їх застосування в долотах при бурінні міцних та абразивних гірських порід.

Відзначено, що на сучасному етапі конструювання бурових інструментів не існує розв'язку контактної задачі термопружності за наявності зносу робочої поверхні долота з повним відображенням специфічних особливостей надтвердих матеріалів і мікрогеометрії контактної пари в умовах буріння свердловин, а дослідження феномену покращання структури і властивостей алмазовмісного композита є дуже складною проблемою, найважливіші аспекти якої (дифузії і хімічні процеси) ще не досить вивчені.

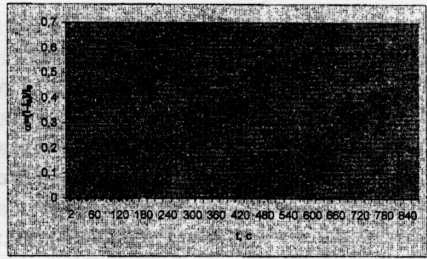
У зв'язку з цим виникає необхідність розробки нового теоретичного підходу на основі аналітичних методів дослідження термопружного стану та зношування алмазних доліт, які дозволяють визначити основні фактори, що істотно впливають на кінетику даних процесів і встановлення кількісних параметрів, що напряму визначають якість НКММ ще на стадії їх виготовлення.

В другому розділі наведено класифікацію алмазних бурових інструментів і досліджується вплив мікрогеометричних характеристик алмазовмісного шару композита, форми профілю і умов буріння на роботоздатність таких інструментів. Викладено оригінальні методики експериментального дослідження силових і енергетичних параметрів процесу спікання бурових вставок залежно від хімічного складу, мікрогеометричних характеристик алмазів, геометрії алмазовмісного шару композита, технологічних умов спікання, а також зносостійкості дослідних зразків при бурінні.

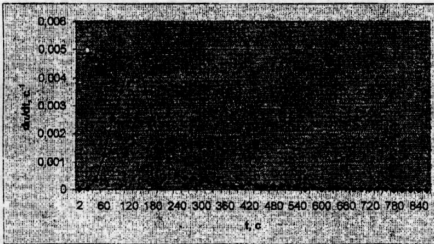
Дослідження кінетики усадки бурових вставок однакових розмірів (діаметром 10 мм, висотою 10 мм і товщиною алмазовмісного шару 3 мм) при спіканні методом гарячого пресування проводили для двох різних складів. Зразки першого типу отримано на основі вихідної шихти алмаз – твердий сплав ВК6 (зразки 1), а другого – алмаз – твердий сплав ВК6 з добавками порошків CrB_2 і W_2B_5 (зразки 2). Порошки вихідних речовин в потрібній кількості змішували в млині при співвідношенні мас куль і порошків 1:4 протягом 24 год. Природні овалізовані алмази зернистістю 800/630 (середній діаметр алмазів 0,75 мм) за відносної концентрації $K = 100$ домішували в суміші вихідних речовин без використання розмельних куль. Розміри частинок порошків WC , Co , CrB_2 і W_2B_5 після приготування сумішей мали значення 3 – 5 мкм. Процес спікання здійснювали на спеціальній установці при варіюванні температури від 300 до 1800 К і тиску від 0,5 до 32 МПа. Підняття і стабілізацію температури і тиску на усьому етапі спікання виконували з точністю ± 10 градусів і 100 Па відповідно, припускаючи, що вуглецевомісне (графітове) середовище не впливає на результат. При цьому детально вивчали залежності відносної усадки від змінювання температури T і тиску p . По експериментальним значенням відносної усадки розраховували швидкість усадки з використанням кубічних сплайн-функцій. Отримані результати кінетики усадки при спіканні дослідних зразків 1 і 2 наведено на рис. 1 і 2.



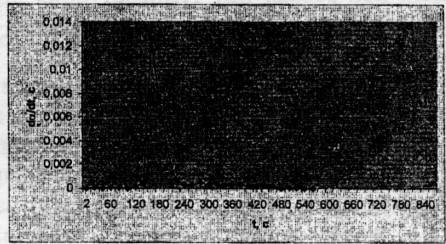
а



а



б



б

Рис. 1. Залежності відносної усадки (а) і швидкості відносної усадки da/dt (б) процесу спікання бурових вставок стандартного складу (зразки 1).

Рис. 2. Залежності відносної усадки а (а) і швидкості відносної усадки da/dt (б) процесу спікання бурових вставок з добавками до вихідної шихти порошків CrB_2 і W_2B_5 (зразки 2).

Аналіз цих залежностей показує, що процес спікання зразків умовно можна розділити на два етапи чи стадії. На першій стадії внаслідок інтенсивного нагрівання і зростання тиску пресування з моменту утворення рідкої фази відбувається усадка із зростаючою швидкістю (тривалість цієї стадії 165 – 185 с). Внаслідок цього між-центрова відстань між частинками порошків зменшується на другій стадії і досягає граничної межі при $da/dt \rightarrow 0$. Структура і фізико-механічні властивості композиту в робочому інтервалі $p - T - t$ змінюються за рахунок ущільнення складових шихти на молекулярному рівні, що слід враховувати при дослідженні кінетики процесів, які відбуваються при спіканні. Також аналізується вплив добавок CrB_2 і W_2B_5 на кінетику усадки при спіканні зразків.

Установлено, що внаслідок активної взаємодії цих добавок з основними компонентами шихти усадка при спіканні зразка 2 досягає граничних значень $da/dt \rightarrow 0$ на 250 с раніше, ніж при спіканні зразка 1 (рис. 2, б і 1, б).

Методологію структурних досліджень було обрано на основі сучасних уявлень про формування фізико-механічних властивостей алмазовмісних композиційних матеріалів. Далі на основі запропонованої формули аналізуються залежності теплового потоку при руйнуванні гірських порід буровими вставками від середнього діаметра

алмазного зерна, об'ємної частки алмазів в композиті, вертикальної складової навантаження і лінійної швидкості обертання. Показано, що ця формула дозволяє цілком закономірно і адекватно реальному процесу буріння визначити тепловий потік і її можна використати як додаток в рівняннях теплопровідності, термопружності і зносостійкості алмазних доліт. Вивчено залежності лінійного і масового зносу бурових вставок, які спечено методом гарячого пресування в інтервалі температур 300 – 1800 К і тисків 0,5 – 32 МПа, від хімічного складу композита, концентрації і зернистості алмазів, кутової швидкості і навантаження. Значення зносостійкості дослідних зразків породоруйнівних елементів можуть змінюватися у декілька разів, що слід враховувати при розрахунку температурних полів, термопружного стану і кінетики зношування. Проведено аналіз цих змін на основі літературних і експериментальних даних, одержаних в ІНМ.

Третій розділ присвячено математичній постановці та розв'язку нестационарної задачі теплопровідності та зв'язаної з цим контактної задачі термопружності для півсферичного тіла з алмазним покриттям, яке наближено моделює роботу алмазного бурового долота. Відшукування рівнянь теплопровідності є проміжним етапом розв'язку задачі термопружності і зношування такого долота.

1. Задача теплопровідності. Фізичні передумови і математична постановка задачі. Півсферичне долото представляється в сферичній системі координат (r, φ, θ) у вигляді двошаркового шару

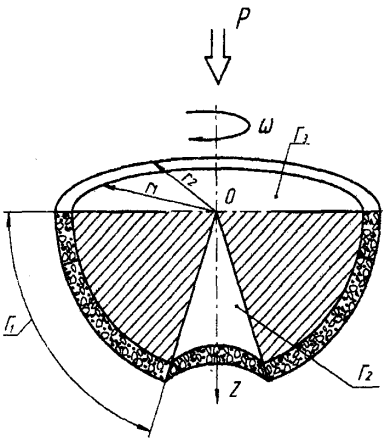


Рис. 3. Схема контакту долота з породою: Γ_1 – поверхня контакту долота з породою; Γ_2 – внутрішня поверхня долота; P – вертикальне зусилля; ω – кутова швидкість.

$$G_1 = \left\{ (r, \varphi, \theta) \mid r \in [0, r_2], \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \right\},$$

на яке нанесене покриття товщиною $h_a = r_2 - r_1$, з якого видалено сферичний сектор (рис. 3).

$$G_2 = \left\{ (r, \varphi, \theta) \mid r \in [0, r_2], \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in [0, \theta_0] \right\}.$$

Тоді зона $\Omega = G_1 \setminus G_2$ буде являти собою долото

$$\Omega = \left\{ (r, \varphi, \theta) \mid r \in [0, r_2], \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in \left[\theta_0, \frac{\pi}{2} \right] \right\}.$$

Тут з урахуванням того, що $h_a \ll r_1$, зона Ω_1 відповідає корпусу долота

$$\Omega_1 = \left\{ (r, \varphi, \theta) \mid r \in [0, r_1], \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in \left[\theta_0, \frac{\pi}{2} \right] \right\},$$

а зона Ω_2 відповідає його ріжучій поверхні

$$\Omega_2 = \Omega \setminus \Omega_1 = \left\{ (r, \varphi, \theta) \mid r \in [r_1, r_2], \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in \left[\theta_0, \frac{\pi}{2} \right] \right\}.$$

Матеріал зони Ω_2 являє собою композиційний матеріал, матриця якого спечена методом гарячого пресування із суміші частинок природних чи синтетичних алма-

зів і дрібніших порошків карбіду вольфраму WC і кобальту Co. Ця суміш може вмішувати в собі добавки порошків тугоплавких сполук перехідних металів (дибориду хрому CrB₂, пентабориду дівольфраму W₂B₃, карбіду бору B₄C тощо) в малій кількості відносно основних компонентів, а Ω₁ зроблено зі сталі із заданими теплофізичними властивостями. При цьому фізико-механічні властивості матриці композита істотно відрізняються від аналогічних властивостей основи долота. В зоні контакту ріжучої поверхні алмазного долота з вибоєм

$$\Gamma_1 = \left\{ (r, \varphi, \theta) \mid r = r_2, \varphi \in [0, 2\pi], \theta \in \left[\theta_0, \frac{\pi}{2} \right] \right\} \text{ воно нагрівається за рахунок сили тертя}$$

(взаємодія долота з гірською породою), щільність теплового потоку q пропорційна нормальному тиску, лінійній швидкості і довжині контактної ділянки:

$$q = q_m \sin \theta = q_m \sqrt{1 - \mu^2}, \quad (1)$$

де $\mu = \cos \theta$, а щільність теплового потоку з урахуванням специфічних особливостей НКМ визначається за отриманою нами формулою

$$q_m = (6k_1 k r_2 P \omega V_p) / (100 \pi d^2 N), \quad (2)$$

де d – середній діаметр алмазних зерен; N – кількість ріжучих алмазів; V_p – об'ємна частка алмазів в матриці композита; k_1 – коефіцієнт, який враховує кількість тепла, що витрачається на нагрівання долота; k – коефіцієнт тертя.

На верхній поверхні долота $\Gamma_3 = \{(r, \varphi, \theta) \mid r \in [0, r_2], \varphi \in [0, 2\pi], \mu = 0\}$ припускаємо відсутність теплового потоку

$$\frac{\partial T}{\partial \mu} = 0. \quad (3)$$

На решті поверхні долота $\Gamma_1 \cup \Gamma_2$ ($\Gamma_2 = \{(r, \varphi, \theta) \mid r \in [0, r_2], \varphi \in [0, 2\pi], \mu \in [\mu_0, 1]\}$) проходить охолодження рідиною за рахунок конвективного теплообміну

$$q_1 = \alpha_1 (T_n - T_q), \quad (4)$$

причому коефіцієнт теплообміну розраховується за формулою

$$\alpha_1 = \frac{2\lambda_q (Re^2 + Gr)^{0.164}}{r_2}, \quad (5)$$

де числа Рейнольда і Грасгофа відповідно дорівнюють $Re = \frac{4\omega r_2^2}{\nu}$; $Gr = \frac{8\beta g r_2^3 \Delta T}{\nu^2}$; λ_q

– коефіцієнт теплопровідності рідини; ν – кінематична в'язкість; β – коефіцієнт розширення рідини; r_2 – зовнішній радіус долота; g – прискорення вільного падіння; $\Delta T = T_n - T_q$ – різниця температури робочої поверхні долота T_n і рідини T_q , причому властивості охолоджуючої рідини (води) приймаються за температуру кипіння. Аналіз співвідношень для визначення Re і Gr показує, що числа Рейнольда і Грасгофа при бурінні алмазним долотом ІНМ – 214,3 Т ($r_1 = 0,103$ м; $r_2 = 0,107$ м; $\omega = 6$ с⁻¹)

мають такі значення: $Re = 9,346 \cdot 10^5$; $Gr = 8,111 \cdot 10^{11}$. Критеріальний безрозмірний параметр $Gr/Re^2 = 0,93 > 0,1$ вказує на те, що тепловіддача в процесі буріння відбувається внаслідок сумісної дії природної і примусової конвекції.

Задача визначення нестационарного температурного поля алмазного долота зводиться до рішення системи рівнянь теплопровідності в сферичній системі координат:

$$\frac{1}{v_i} \frac{\partial u}{\partial t} - \Delta u = 0, \quad (\rho, \mu) \in \Omega, \quad t > 0, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

за початкової умови

$$T(\rho, \mu, 0) = u_0 = \frac{T_0 - T_q}{T_k - T_q}, \quad (7)$$

граничної умови спряження на границі шарів

$$[u] = \left[\lambda \frac{\partial u}{\partial \rho} \right] = 0, \quad \rho = \rho_1, \quad \mu \in [0, \mu_0], \quad (8)$$

і умов теплообміну на границі Γ_1

$$\frac{\partial u}{\partial \rho} + hu|_{\rho=1} = G\sqrt{1-\mu^2}, \quad \mu \in [0, \mu_0], \quad (9)$$

на границі Γ_2

$$-\frac{1}{\rho} \sqrt{1-\mu^2} \frac{\partial u}{\partial \mu} + hu|_{\mu=\mu_0} = 0, \quad \rho \in [0, 1], \quad (10)$$

за відсутності теплового потоку на Γ_3

$$\frac{\partial u}{\partial \mu} \Big|_{\mu=0} = 0, \quad \rho \in [0, 1]. \quad (11)$$

При цьому використано такі позначення: $u = \frac{T_i - T_q}{T_k - T_q}$; $\rho = \frac{r_1}{r_2}$; $h = \frac{\alpha_1 r_2}{\lambda_2}$;

$G = \frac{q_m r_2}{\lambda_2 (T_k - T_q)}$; $v_i = \frac{\chi_i}{r_2^2}$; $\Delta = \frac{1}{\rho^2} \left[\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial \mu} \left[(1-\mu^2) \frac{\partial}{\partial \mu} \right] \right]$ – оператор Лапласа, а індекси: 1 – відповідає сталевому корпусу долота, 2 – алмазовмісному шару (алмаз – 94 WC + 6 Co).

Особливістю задачі (6) – (11) є присутність істотно неоднорідних граничних умов на поверхні Γ_1 і Γ_2 . Відзначимо, що навіть за однорідних граничних умов I і II роду на конічній поверхні не вдається знайти точний розв'язок задачі. При її вирішенні використаний метод Гальоркіна у гільбертовому просторі, що є сумою гільбертових просторів в зоні і на границі зі спеціальним вибором координатних функцій. Вони є власними функціями спектральних задач з параметром в рівнянні і граничних умовах. Це дозволило отримати розв'язок, що збігається до точного в сере-

дньому як в зоні, так і на її границі, що є особливо важливим при моделюванні контактних задач.

На основі отриманого розв'язку наведено результати розрахунків температурних полів в алмазному долоті ПМ – 214,3 Т від часу, теплофізичних характеристик матеріалу композита і долота, радіальної та кутової координати профілю, концентрації і зернистості алмазів, відносного значення коефіцієнта теплообміну в умовах буріння абразивних гірських порід.

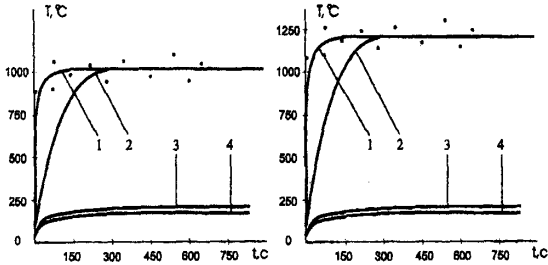


Рис. 4. Графічні зображення поля температур в алмазному долоті від часу при $\rho = 1,0$ (1), $0,98$ (2), $0,8$ (3) і $0,75$ (4) в процесі буріння граніту (а) і пісковиком (б) при $p = 30$ МПа, $\omega = 6c^{-1}$, $\lambda_1 = 80$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 120$ Вт/(м·К), $\alpha_1 = 1,5$ кВт/(м²·К), $K = 100$, $3 = 800/630$ (—, • — розрахункові і експериментальні дані відповідно).

їх аналіз показує, що температурне поле в долоті залежно від радіальної координати ρ досить швидко виходить на усталений режим. При цьому контакті температури при бурінні пісковиком (рис. 4, б) мають відносно більші значення, ніж при бурінні граніту,

що є наслідком відмінності фізико-механічних характеристик порід. Висока збіжність розрахункових з експериментальними даними свідчить про точність і адекватність розробленої моделі. При зростанні коефіцієнта теплопровідності матеріалу композита λ_2 від 100 до 200 Вт/(м·К) спостерігається істотне зменшення температури на робочій поверхні долота (рис. 5, а).

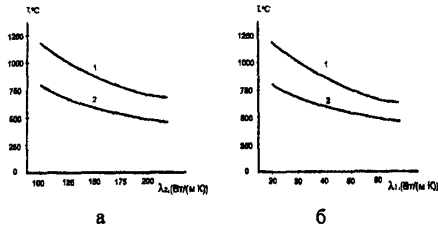


Рис. 5. Вплив коефіцієнтів теплопровідності матеріалу композита (а) і основи долота (б) при $p = 25$ (1) і $p = 30$ (2) МПа на контактну температуру в процесі буріння пісковиком для: $\alpha_1 = 1,5$ кВт/(м²·К); $K = 100$; $3 = 800/630$; $t = 1000$ с; $\rho = 1,0$.

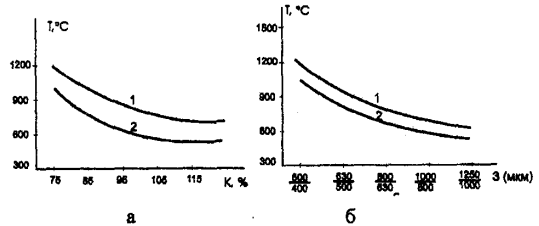


Рис. 6. Вплив концентрації (а) і зернистості алмазів (б) при $\theta = 60$ (1) і 45 (2) град на контактну температуру в процесі буріння пісковиком для: $\alpha_1 = 1,5$ кВт/(м²·К); $t = 1000$ с; $\rho = 1,0$; а — $\lambda_1 = 40$ Вт/(м·К); б — $\lambda_2 = 120$ Вт/(м·К); $p = 27,3$ МПа і $v = 4$ м/с.

Збільшення коефіцієнта теплопровідності основи долота мало впливає на контактну температуру. Потрібно відмітити, що теплопровідність композитів алмаз – твердий сплав ВК6 залежить, основним чином, від ступеня ущільнення складових композита та їх геометричних розмірів. Примусове введення до вихідної шихти більш теплопровідних порошків металів і неметалів по відношенню до основних компонентів може погіршувати структуру і властивості матеріалу, а також привести до окиснення НКАМ при спіканні. Продовжуючи аналізувати температурний стан алмазного долота, відзначимо, що температура робочої поверхні при бурінні абразивних порід суттєво залежить від концентрації алмазів K (рис. 6, а) і зернистості (рис. 6, б), кутової координати θ (рис. 7, а), відносного значення коефіцієнта теплообміну (рис. 7, б), контактної тиску p (рис. 8, а) і лінійної швидкості ковзання (рис. 8, б).

Аналіз отриманих результатів показує, що температурне поле в долоті швидко виходить на ustalений режим. Позитивно впливає на температурний стан долота збільшення відносного значення коефіцієнта теплообміну α та коефіцієнта теплопровідності матеріалу композита, а також збільшення концентрації алмазів до значень $K = 100$ і зернистості в інтервалі від 800/630 до 1000/800. Збільшення кутової координати θ , кутової швидкості обертання ω і контактної тиску p приводить до стрімкого зростання температури на робочій поверхні долота, що вказує на доцільність оптимізації технологічних режимів буріння і вибору профілю долота.

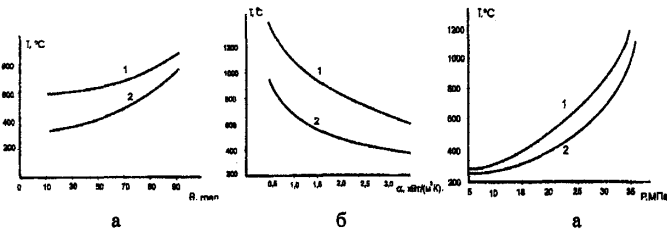


Рис. 7. Залежності температури на робочій поверхні долота від кутової координати (а) при $p = 27,3$ (1) і $30,0$ (2) МПа і відносного значення коефіцієнта теплообміну (б) при $\theta = 88$ (1) і 65 (2) градс при бурінні пісковиків для: $K = 100$; $3 = 800/630$ (умови такі ж, як на рис. 5).

Рис. 8. Вплив тиску (а) і лінійної швидкості ковзання (б) при $\theta = 85$ (1) і $\theta = 65$ (2) град на температуру робочої поверхні долота (умови такі ж, як на рис. 5).

2. Контактна задача термопружності. Особливістю цієї задачі є те, що напруження залежить від температури не лінійно, а умови рівноваги включають компоненти вектора об'ємної сили. Задача нелінійна, вона розв'язується ітераційним методом. Термонапруження визначаємо за допомогою термопружного потенціалу

переміщень, їх використовуємо для визначення загальних напружень з умови рівноваги, які знову використовуємо для визначення температури долота, термонапружень і т.д. При визначенні температури долота враховуємо теплофізичні характеристики як долота, так і гірської породи. Розв'язок задачі отримано у вигляді рядів по поліномах Лежандра і сферичних функціях, що дозволяє визначити компоненти квазістатичних термонапружень за довільний проміжок часу і проаналізувати основні фактори, що впливають на кінетику цього процесу.

Отримані рівняння для розрахунку температурних $\bar{\sigma}_y$ і механічних $\bar{\sigma}_y$ напружень в алмазному долоті в процесі буріння свердловин мають вигляд:

$$\bar{\sigma}_r = \frac{E}{(1+\nu)r_2^2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \rho^2} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \frac{E}{1-\nu} \alpha_T (T_k - T_{\infty}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{(4n+1)(4n^2-2n-4)}{4n+3} \rho^{2n} P_{2n}(\mu); \quad (12)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = \frac{E}{(1+\nu)r_2^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \theta^2} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = -\frac{E}{(1-\nu)} \alpha_T (T_k - T_{\infty}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{(4n+1)}{4n+3} \rho^{2n} \left((2n+2)^2 P_{2n}(\mu) - \mu \frac{dP_{2n}}{d\mu} \right); \quad (13)$$

$$\bar{\sigma}_{\varphi\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)r_2^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \mu \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \mu} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = -\frac{E}{(1+\nu)} \alpha_T (T_k - T_{\infty}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{4n+1}{4n+3} \rho^{2n} \left((6n+4) P_{2n}(\mu) + \mu \frac{dP_{2n}}{d\mu} \right); \quad (14)$$

$$\bar{\sigma}_{\varphi r} = \frac{E}{2(1+\nu)r_2^2} \left[\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \rho \partial \theta} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \theta} \right) \right] = \frac{E}{2(1+\nu)} \alpha_T (T_k - T_{\infty}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{4n+1}{4n+3} \rho^{2n} (2n+1) \sqrt{1-\mu^2} \frac{dP_{2n}}{d\mu}; \quad (15)$$

$$\bar{\sigma}_r = \frac{E}{1+\nu} \sum_{n=0}^{\infty} [c_{2n} 2n(2n-1)(\rho r_2)^{2n-2} + d_{2n} (2n+1)(4n^2-2n-2-2\nu)(\rho r_2)^{2n}] P_{2n}(\mu); \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = -\frac{E}{1+\nu} \sum_{n=0}^{\infty} \{ c_{2n} (4n^2 P_{2n}(\mu) - \mu P'_{2n}(\mu)) (\rho r_2)^{2n-2} + \}; \quad (17)$$

$$+ d_{2n} \{ (2n+1)(4n^2+8n+2+2\nu) P_{2n}(\mu) - (2n+5-4\nu) \mu P'_{2n}(\mu) \} (\rho r_2)^{2n} \}; \quad (18)$$

$$\bar{\sigma}_{\varphi\varphi} = \gamma \omega^2 r^2 (1-\mu^2) + \frac{E}{1+\nu} \sum_{n=0}^{\infty} \{ c_{2n} (2n P_{2n}(\mu) - \mu P'_{2n}(\mu)) (\rho r_2)^{2n-2} + \}; \quad (18)$$

$$+ d_{2n} \{ (2n+1)(2n-2-2\nu-8\nu) P_{2n}(\mu) - (2n+5-4\nu) \mu P'_{2n}(\mu) \} (\rho r_2)^{2n} \}; \quad (18)$$

$$\bar{\sigma}_{\varphi r} = -\frac{E}{1+\nu} \sum_{n=0}^{\infty} [c_{2n} (2n-1)(\rho r_2)^{2n-2} + d_{2n} (4n^2+4n-1+2\nu)(\rho r_2)^{2n}] \sqrt{1-\mu^2} P'_{2n}(\mu), \quad (19)$$

де E – модуль пружності матеріалу композита; ν і α_T – коефіцієнти Пуассона і теплового розширення матеріалу композиту; $P_{2n}(\mu)$ – поліном Лежандра парного порядку.

Складові загальних термонапружень визначаються у вигляді суми:

$$\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_y \quad (20)$$

Таким чином, за допомогою отриманих рівнянь (12) – (20) можна описати термопружний стан алмазного долота в процесі буріння свердловини. На рис. 9 наведено графічні зображення термонапружень при бурінні пісковіку і граніту алмазним долотом ІНМ-214,3 Т.

Їх аналіз показує, що при бурінні граніту загальні складові напружень σ_r , $\sigma_{\theta\theta}$, $\sigma_{\varphi\varphi}$ мають менші значення, ніж при бурінні пісковіку (рис. 9, а, б, в, криві 1 і 2 відповідно). Вони залежать від радіальної і кутової координат, швидкості обертання і

вертикальної нагрузки. Максимальні значення загальних радіальних напружень σ_{rr} досягаються на поверхні долота при $\theta = 18^\circ$ і $\theta = 90^\circ$ (див. рис. 9, а), і дотичні $\sigma_{\theta\theta}$ напруження в цих зонах мають теж максимальні значення, але вони є меншими в порівнянні до σ_{rr} (див. рис. 9, б).

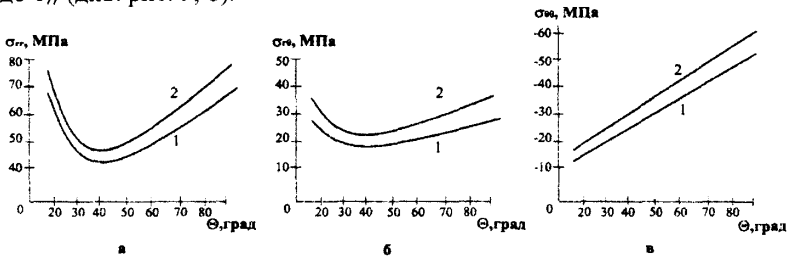


Рис. 9. Залежності радіальних (а), дотичних (б) і тангенціальних (в) загальних напружень від кутової координати θ при бурінні граніту (1) і кварцитового пісковика (2) алмазним долотом ІНМ-214,3 Т для $\rho = 1$; $\omega = 6 \text{ с}^{-1}$; $P = 12000 \text{ кг}$; $\alpha_1 = 1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\lambda_2 = 120 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_1 = 80 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $K = 100$; $\xi = 800/630 \text{ мкм}$.

В порівнянні з σ_{rr} загальні тангенціальні напруження на робочій поверхні долота при $\theta = 18^\circ$ мають найменші значення (див. рис. 9, в), при збільшенні кутової координати вони зростають і при $\theta = 90^\circ$ мають найбільші значення. Продовжуючи аналізувати термопружний стан алмазного долота, відзначимо, що при збільшенні відносного значення коефіцієнта теплообміну α_1 майже не змінюються дотичні напруження, а радіальні збільшуються відносно температурної складової $\bar{\sigma}_{rr}$. Відзначимо, що їх зростання незначне і в результаті менше впливає на роботу бурового долота, ніж на абразивний знос.

У четвертому розділі виконано детальні дослідження формування структури і властивостей композитів системи алмаз – твердий сплав ВК6 та вивчено взаємодію боридів CrB_2 і W_2B_5 з компонентами матриці. Математичну модель побудовано для опису процесів, які відбуваються при спіканні цих матеріалів методом гарячого пресування для загальних умов, коли швидкість процесу контролюється як дифузією, так і хімічною реакцією. Розраховано енергетичні стани реакційних систем, що дало змогу визначити хімічний склад і $p - T - t$ умови спікання, за яких утворюються потрібні структури і фізико-механічні властивості композитів.

В експериментальній частині методами рентгеноспектрального аналізу (РЕМ і ПЕМ) досліджувалися особливості формування структури і властивостей композитів складу алмаз – твердий сплав ВК6 (зразки 1) і алмаз – твердий сплав ВК6 з добавками CrB_2 і W_2B_5 (зразки 2), які виготовлено методом гарячого пресування в інтервалі температури від 300 до 1800 К і тиску від 0,5 до 32 МПа. Встановлено, що мікроструктура цих зразків істотно відрізняється. В зоні матриці навколо алмаза у зразку 1 спостерігаються мікротріщини і сколювання (рис. 10, а), а також порожнини (рис. 10, б) і ділянки матриці, з яких випали кристали алмаза і тріщини в матриці

(рис. 10, в), а в зразках 2, які містять у вихідній шихті добавки порошоків CrB_2 і W_2B_5 , в цій зоні мікротріщини, порожнини і сколювання відсутні (рис. 10, г, д, е).

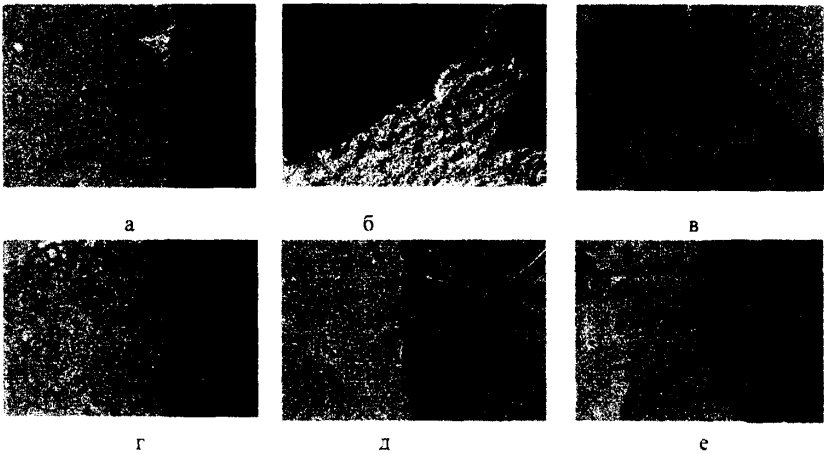


Рис. 10. Мікроструктура зони контакту алмаз – матриця зразків 1 (а) і 2 (г), мікроструктура з'яому контакту алмаз – матриця зразків 1 – б $\times 500$; в $\times 111$; 2 – д, е $\times 270$.

Характерною рисою зразків 2 є і те, що в зоні матриці навколо алмаза спостерігається подрібнення зерен WC, а структура матриці має рельєфну поверхню і алмази, зруйновані сколюванням.

В місцях контакту алмаз – матриця завжди є перехідний прошарок, який істотно відрізняється від матриці морфологією зернистої структури (рис. 11, а, б).

Товщина цього прошарку не перевищує 3 мкм. Практично для всіх випадків, коли трапляється відривання алмазів від матриці (випадіння), а також в місцях несучільності на поверхні контакту алмаз – матриця (рис. 11, г) трапляється занижений вміст Co і W (рис. 11, д, е). При реалізації сколювання алмаза, тобто коли границя контакту є міцною, вміст Co в цій зоні близький чи завищений по відношенню до вмісту Co в матриці, тобто вдалині від цієї границі (рис. 11, в).

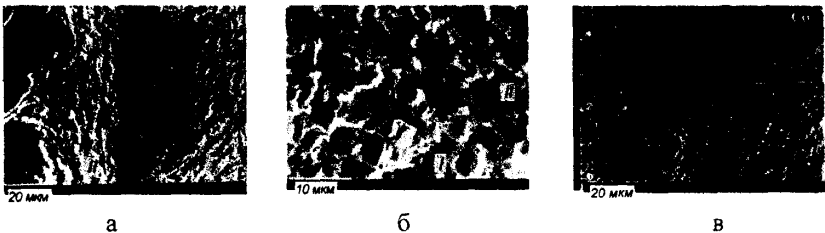




Рис. 11. Мікроструктура проміжного шару алмаз – матриця в зразку 2 (а), фрагмент зображення продуктів взаємодії в матриці (б), розподіл Co за перерізом цього фрагменту (в) і мікроструктура розширювання зони алмаз – матриця в зразку 1(г), а також розподілення Co (д) і W (е): Г – матриця, II – прошарок продуктів взаємодії.

Дослідженнями на ПЕМ встановлено, що для зразків 1 як на поверхні ямок відриву алмаза від матриці, так і на поверхні алмаза, на котрій є прошарки продуктів взаємодії алмаз – матриця в більшості випадків спостерігається виділення вуглецю у вигляді тонких пластинок сильно розупорядкованого графіту (рис. 12, а) і прошарків з особливою субструктурою, яка вміщує включення округлої форми (рис. 12, б), а також графіту у вигляді бахроми, який осідає на зернах карбиду вольфраму (рис. 12, в).

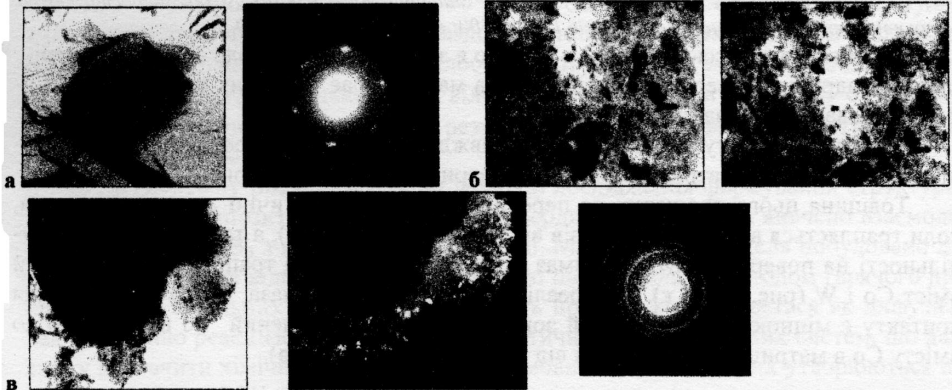


Рис. 12. Мікроструктурні зображення неалмазного вуглецю (ПЕМ), який утворився в продуктах взаємодії алмаз – матриця: частинка вуглецю і мікроелектрограма від неї; б – світлопольні і темнопольні зображення вуглецю в 0,02 г; в – багатофазні осадки вуглецю на поверхні зерен карбиду вольфраму і мікроелектронограма від неї.

В зразках 2 виявлено хром як в матриці, так і в прошарку взаємодії алмаз – матриця. Особливість розподілення вуглецю в матриці полягає в тому, що на спектрах інтенсивності рентгенівського випромінювання його піки збігаються з піками хрому чи розміщуються близько від них. На цьому ґрунтується вивновок, що в першому випадку хром знаходиться у вигляді твердого розчину в кобальті, а в другому – у

вигляді потрійного карбіду в системі WC – Cr – Co. Важливим фактором є також відміна зернистої структури в продуктах взаємодії.

Для зразків 1 трапляється переважно крупнозерниста структура, а для зразків 2 – дрібнозерниста. Мікроструктура макрозлому дослідних зразків також відрізняється. Найбільша щільність макровиступів руйнування в матриці, які починаються біля границі контакту алмаз – матриця, так і біля частинок алмаза, зруйнованих сколюванням, трапляється для зразків 2 (рис. 13, а, б), а найменша – для зразків 1 (рис. 13, в).

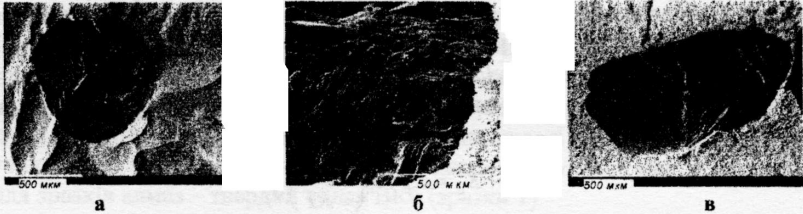


Рис. 13. Зображення на РЕМ типових мікроструктур сколювання частинок алмаза і макрорельєфу руйнування матриці навколо алмаза: зразок 2 (а – загальний вигляд і б – збільшений фрагмент сколювання алмаза); зразок 1 (в).

Мікротвердість матриці в зразках 2 на відстані 50 мкм від границі контакту алмаз – матриця має значення 29,1 ГПа, а на відстані 10 мкм від цієї границі – 23,8 ГПа. Мікротвердість матриці в зразках 1 в цих ділянках мала значення 21,5 і 13,0 ГПа відповідно. Результати досліджень на зносостійкість показали, що інтенсивність зношування зразків 2 вдвічі менша від аналогічного параметру зразків 1. Таке істотне підвищення зносостійкості зразків 2 забезпечується за рахунок надійного утримання кристалів алмаза матриці композита, що запобігає їх випадінню.

Для детального вивчення цих процесів, які відбуваються при спіканні системи алмаз – твердий сплав ВК6, і визначення умов, у яких можуть проявитися найкращі структури, запропоновано кінетичну модель, яка дозволяє визначити енергетичний стан і спрогнозувати властивості композита.

Така модель включає такі рівняння і фізичні положення:

Узагальнене кінетичне рівняння Йохансона – Мела – Аврамі – Єрофєєва – Колмогорова для опису процесів зародкоутворення нових фаз

$$-\ln(1-\alpha) = K_{\alpha} t^n; \quad (21)$$

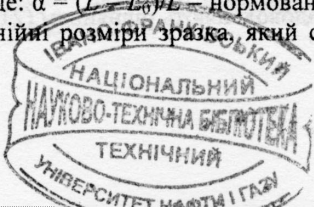
параболічний закон Яндера для описання процесів дифузії

$$(1 - (1-\alpha)^{1/3})^2 = AK_{\alpha} t. \quad (22)$$

Рівняння для випадку, коли швидкість процесу спікання визначає хімічна реакція:

$$(1 - (1-\alpha)^n) = K_{\alpha} t, \quad (23)$$

де: $\alpha = (L - L_0)/L$ – нормована усадка чи відносний параметр ущільнення; L і L_0 – лінійні розміри зразка, який спікається в початковий і змінний момент часу t ; K_{α} –



константа швидкості, c^{-1} ; r і n – показники ступеня, які мають сенс кінетичних параметрів; A – коефіцієнт, що визначає частку порошоків, які не прореагували.

Кінетичне рівняння для загального випадку, коли швидкість процесу спікання одночасно контролюється як дифузією, так і хімічною реакцією:

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha, p, T, t)K_a(T, p), \quad (24)$$

де p і T – змінні тиску і температури спікання, МПа і К відповідно; $K_a(T, p)$ – узагальнена константа швидкості, яка одночасно залежить від температури і тиску, c^{-1} ; $f(\alpha, p, T, t)$ – модельна функція, яка характеризує процеси, що відбуваються, вона задовольняє фізичній залежності кінетичних параметрів.

Розв'язок кінетичних рівнянь (21) – (24) ґрунтується на фізичних положеннях.

Першим положенням є те, що константа швидкості K_a підкоряється закону Арреніуса:

$$K_a = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (25)$$

де K_0 – передекспоненціальний множник (частотний фактор), c^{-1} ; E_a – позірна енергія активації процесу спікання, Дж/моль; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – газова стала.

Другим положенням моделювання є те, що модельну функцію $f(\alpha, p, T, t)$ виражаємо співвідношенням:

$$f(\alpha, p, T, t) = \alpha^m (1 - \alpha)^n, \quad (26)$$

де m і n – показники степеня, які мають зміст кінетичних параметрів процесу спікання (m визначає дифузійні процеси, n – зародкоутворення нових фаз в матеріалі, що спікається).

Проблема застосування рівнянь (21) – (26) є важливою, оскільки до теперішнього часу ще не запропоновано більш якісних математичних моделей, які дозволяють проаналізувати процеси, що відбуваються при спіканні. З одного боку, значення E_a визначає енергетичний бар'єр, який мають здолати атоми реакційної системи для утворення нових фаз і хімічних реакцій, а з другого – E_a визначає залежність процесу від температури. В той же час виникає необхідність врахування впливу тиску на E_a і da/dt при спіканні композитів методом гарячого пресування.

Третім положенням моделювання є врахування тиску пресування на кінетику спікання, в зв'язку з цим в рівнянні (25) позірну енергію активації E_a виражаємо у вигляді:

$$E_a = E_0 - P\Delta V, \quad (27)$$

де E_0 – величина енергетичного бар'єру, який мають здолати атоми системи, що спікається, для реалізації дифузійних процесів і хімічних реакцій, Дж/моль; p – тиск, МПа; ΔV – активаційний об'єм, m^3 /моль.

Кінетичний аналіз процесу спікання дослідних зразків зводиться до вчислення кінетичних констант $K_a(T, p)$, K_0 , E_0 , E_a , ΔV , m і n , які задовольняють рівнянням (21)

– (27) і значенням швидкості усадки. Швидкість усадки розраховували за експериментальними даними відносної усадки з використанням кубічних сплайн-функцій. За допомогою рівнянь, отриманих на основі моделей (21) – (23) і (25) – (27), проведено кінетичний аналіз процесу спікання зразків складу алмаз – твердий сплав ВК6 (зразки 1) і алмаз – твердий сплав ВК6 з добавками CrB_2 і W_2B_5 (зразки 2). Встановлено, що при спіканні цих зразків на різних стадіях відбувається зміна енергії активації дифузії E_D , зародкоутворення нових фаз E_G , хімічних реакцій між компонентами E_R , а також активаційного об'єму ΔV . Зміна ΔV пов'язана з утворенням і рухом моля дефектів, який забезпечує той чи інший процес

Інша картина спостерігається при використанні розробленої моделі (24) – (27) для опису процесів, які відбуваються при спіканні матеріалу для загального випадку, коли швидкість усадки контролюється як дифузією, так і хімічною реакцією. Отримані рівняння, які виражають зв'язок швидкості спікання методом гарячого пресування з кінетичними параметрами, на заключному етапі мають вигляд:

для зразків алмаз – твердий сплав ВК6 (зразки 1)

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0,0596\alpha^{0,59}(1-\alpha)^{3,51} \exp\left(-\frac{7420,43-0,001105}{RT}\right), \quad (28)$$

для зразків алмаз – твердий сплав ВК6 з добавками CrB_2 і W_2B_5 (зразки 2)

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha^{1,3678}(1-\alpha)^{11,5902} \exp\left(-\frac{30815,3734-0,000134P}{RT}\right), \quad (29)$$

де параметри співвідношення $\alpha^m(1-\alpha)^n$ визначають дифузійні і хімічні процеси, які паралельно відбуваються при спіканні. Аналіз рівняння (28) показує, що при спіканні зразків 1 на заключному етапі має місце дифузія (кінетичний параметр $m = 0,59$) з відносно низьким значенням порядку хімічної реакції (кінетичний параметр $n = 3,51$). В той же час при спіканні зразків 2 на цій стадії кінетичний параметр $m = 1,37$ вказує на об'ємні дифузійні процеси, зміну механізму переносу маси (перегрупування частинок складових композита на молекулярному рівні) зі значним збільшенням порядку хімічної реакції (кінетичний параметр $n = 11,59$). При цьому значення активаційного об'єму $\Delta V_2 = 0,000134 \text{ м}^3/\text{моль}$ по відношенню до аналогічного параметра зразка 1 $\Delta V_1 = 0,001105 \text{ м}^3/\text{моль}$ свідчить про активацію процесу і краще ущільнення структурних складових композита. Значення енергії активації процесу спікання цього зразка $E_2 = 30815,37 \text{ Дж/моль}$ в порівнянні зі значенням енергії активації при спіканні зразку 1 $E_1 = 7420,43 \text{ Дж/моль}$ свідчать, що у даний момент часу на границях контакту алмаз – матриця, як вже було показано раніше, утворилися досить міцні хімічні зв'язки (утворення складного карбиду в системі $\text{WC} - \text{Cr} - \text{Co}$) і нові фази в матриці, на що і знадобилась системі, яка вміщує у вихідній шихті добавки CrB_2 і W_2B_5 , допоміжна енергія. Характерною рисою цих рівнянь є і те, що зміна енергії активації процесу спікання зумовлює істотну зміну кінетичних констант і параметрів.

В даному розділі наведено також результати статистичної перевірки кінетичних рівнянь (значення коефіцієнтів кореляції, фактичного і критичного значень критеріів Фішера за рівня значущості $\alpha = 0,05$). Для всіх отриманих рівнянь значення $F_{роз.} > F_{кр.}$ вказують на їх достовірність і точність отриманих результатів.

У п'ятому розділі розв'язано задачу зношування алмазного долота в процесі буріння свердловини з урахуванням специфічних особливостей надтвердого композиційного матеріалу, геометричних розмірів профілю, складних умов теплообміну, контактного термонапруження і залежності коефіцієнта зносу від температури та наведено результати промислових випробувань бурових інструментів.

Фізичні обґрунтування та математична постановка задачі. Припустимо, що в певній напівпростір (гірська порода) вдавлюється напівсферичне долото

$\Omega = \left\{ (r, \theta, \varphi) \mid r \in [0; r_2], \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \right\}$. Зусилля P прикладено по осі симетрії долота, яке обертається навколо осі Oz з постійною кутовою швидкістю ω (див. рис. 3). В зоні контакту долото – гірська порода $\Gamma = \left\{ (r, \varphi) \mid r = r_2; \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \right\}$ присутні радіальні $\sigma_r(r_2, \theta, t)$ і дотичні $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ контактні напруження, пов'язані між собою законом Кулона:

$$\sigma_{r\theta}(r, \theta, t) = k \sigma_r(r_2, \theta, t). \quad (30)$$

де k – коефіцієнт тертя.

Контактні напруження $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ здійснюють в одиницю часу роботу:

$$A = \omega r_2 \sin \theta \sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t) = \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} \sigma_{r\theta}(r_2, \mu, t) = \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} k \sigma_r(r_2, \mu), \quad (31)$$

яка витрачається переважно на теплоутворення, внаслідок чого робоча поверхня алмазного долота зношується. Поскільки контактні температури і термонапруження швидко виходять на квазіусталений режим (див. розділ 3), то це дозволяє вважати, що основним видом зносу алмазного долота є абразивний. Тоді коефіцієнт зносу залежить від температури, контактний тиск представляємо як загальні радіальні напруження $\sigma_r(r_2, \mu) = \bar{\sigma}_r(r_2, \mu) + \bar{\bar{\sigma}}_r(r_2, \mu)$, а швидкість ковзання залежить від кутової координати θ . На цій основі диференціальне рівняння швидкості зношування алмазного долота в процесі буріння свердловин можемо записати у такому вигляді:

$$\frac{dW.}{dt} = K_1 \sigma_r(r_2, \mu) \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2}. \quad (32)$$

де K_1 – коефіцієнт абразивного зношування, який визначається залежно від температурного розподілу співвідношенням:

$$K_1 = K_1 + K_2 T(r_2, \mu, t). \quad (33)$$

де K_1 і K_2 – складові лінійної залежності коефіцієнта зношування від температури; ω – кутова швидкість обертання; r_2 – зовнішній радіус долота; $\mu = \cos \theta$.

Розв'язок задачі. Проінтегрувавши диференціальне рівняння (32) з урахуванням (33) і нульової початкової умови, отримуємо залежність зношування долота від часу буріння:

$$W_s = (K_1 + K_2 T(r_2, \mu)) \sigma_{rr}(r_2, \mu) \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} t, \quad (34)$$

де $\sigma_{rr}(r_2, \mu)$ – радіальні контактні напруження; $T(r_2, \mu)$ – температурний розподіл в долоті, визначається на основі отриманого розв'язку.

Для детальшого аналізу зношування доліт ми провели дослідження залежності коефіцієнта зносу породоруйнівних вставок алмаз – твердий сплав ВК6 від контактної температури $T(r_2, \mu)$. На основі статистичного аналізу експериментальних даних маємо залежність коефіцієнту зносу від температури:

$$K_i(T) = \begin{cases} K_0, & 0 \leq T \leq 350 \text{ } ^\circ\text{C} \\ K_1 + K_2 T(r_2, \mu), & T > 350 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (35)$$

де $K_0 = 7,28741 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Н}$; $K_1 = -5,49318 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Н}$; $K_2 = 3,64847 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2/(\text{Н}\cdot\text{град})$, причому відносна похибка такого представлення не перевищує 5 %.

Остаточна формула для визначення зношування алмазного долота в процесі буріння свердловини має вигляд:

$$W_s = \frac{E \omega r_2}{1 - \nu} \alpha_1 (T_k - T_w) k \sqrt{1 - \mu^2} \times \quad (36)$$

$$\times \left[K_1 + K_2 (T_w + (T_k - T_w)) \sum_{n=0}^{\infty} (4n+1) A_{2n} P_{2n}(\mu) \right] \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_{2n} \frac{(4n-1)(2n-1)(4-2n)}{4n+3} + \beta_{2n} \right) P_{2n}(\mu),$$

де E – модуль пружності матеріалу композита; ν і α_1 – коефіцієнти Пуассона і теплового розширення матеріалу композиту відповідно.

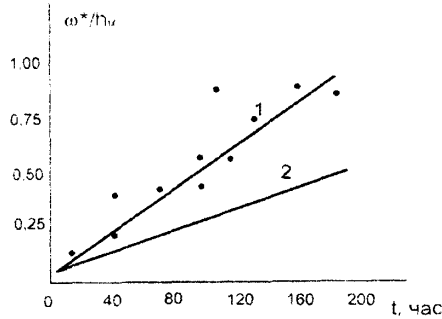


Рис. 14. Залежності зношування доліт 1 і 2 від часу при бурінні кварцитового пісковиком за таких умов: $\lambda_2 = 120 \text{ Вм}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_1 = 40 \text{ Вм}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $p = 30 \text{ МПа}$; $v = 4 \text{ м/с}$; $\theta = 90^\circ$; $\alpha_1 = 1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $K = 100$ і $Z = 800/630 \text{ мкм}$; —, • розрахункові і експериментальні значення відповідно.

$$A_{2n} = \frac{\beta_{2n}}{(2n+1) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} 2n + \frac{\alpha \omega^2}{\lambda_2}};$$

$$\beta_{2n} = ((2n+1)(4n^2 - 2n - 2) - 2\nu) k_{2n}, \quad (37)$$

$P_{2n}(\mu)$ – поліном Лежандра парного порядку.

На основі отриманих залежностей (36) і (37) проведено аналіз кінетики зношування алмазних доліт ПНМ – 214,3 Т, оснащених

породоруйнівними вставками двох типів при бурінні пісковиком. Бурові вставки першого типу виготовлено на основі вихідної шихти стандартного складу алмаз – твердий сплав ВК6 – долото 1, другого – алмаз – твердий сплав ВК6 з добавками до вихідної шихти порошоків SiB_2 і W_2B_5 в малих кількостях в порівнянні до основних складових

шихти – долото 2. Аналіз рис. 14 показує, що знос бурових доліт 1 і 2 швидко виходить на усталений квазістаціонарний режим і істотно залежить від хімічного складу

композита. За однакових значень концентрації і зернистості алмазів швидкість зношування долота 2 вдвічі менша за аналогічний параметр долота 1. Це пов'язано з тим, що CrB_2 і W_2B_5 суттєво покращують структуру і фізико-механічні властивості композита і підвищують міцність контакту алмаз – матриця. Дуже важливим тут є те, що такий підхід дозволяє отримувати кількісну і якісну оцінку зношування алмазних доліт в процесі їх роботи. Висока збіжність розрахункових з експериментальними даними вказує на точність отриманих результатів. При збільшенні теплопровідності матеріалу композиту λ_2 від 100 до 200 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ трапляється істотне зменшення швидкості зношування долота (рис. 15, а). Подальше його збільшення суттєво не впливає на знос інструменту, хоча і зумовлює незначне його зменшення. Збільшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу корпусу долота λ_1 від 20 до 80 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ практично не впливає на зносостійкість алмазного долота (рис. 15, б). На основі подальших розрахунків встановлено, що знос доліт істотно залежить від концентрації і зернистості алмазів, контактного тиску, кутової координати, відносного значення коефіцієнта теплообміну та лінійної швидкості ковзання. За допомогою цих розрахунків було обрано раціональні характеристики алмазовмісного шару в композиті та оптимізовано технологічні режими буріння, що дало змогу забезпечити рівномірний знос профілю і суттєво підвищити зносостійкість інструменту. Наприклад, показано, що використання системи охолодження, яка дозволяє забезпечити підвищення відносного значення коефіцієнта теплообміну від 0,5 до 3,5 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ підвищує зносостійкість алмазних доліт до 2,5 разів залежно від продуктивності буріння. Збільшення лінійної швидкості ковзання, навпаки, призводить до стрімкого зростання зносу алмазного долота.

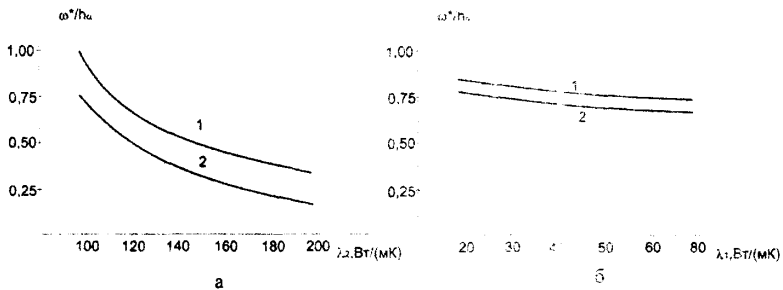


Рис. 15. Графічні залежності швидкості зношування алмазного долота від коефіцієнтів теплопровідності матеріалу композита (а) і корпусу долота (б) в процесі буріння кварцитового пісковуку при: $\theta = 70^\circ(1)$ і $50^\circ(2)$ для $p = 30$ МПа; $\alpha_1 = 1,5$ $\text{кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $K = 160$; $Z = 800/630$ мкм; $t = 200$ год; $v = 4$ м/с; а – $\lambda_1 = 40$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; б – $\lambda_2 = 120$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Далі представлено конструкторські розробки трьох різних за функціональним призначенням інструментів: бурове долото ІНМ – АП – 16,5 І С, калібратор ІНМ – К – 295,3 СТ та бурильна головка ІНМ – АП – 212,7/160 С (рис. 16).



Рис. 16. Алмазний буровий інструмент: буре долото ІНМ – АП – 165,1 С (а); калібратор ІНМ – К – 295,3 СТ (б); бурильна головка ІНМ – АП – 212,7/100 С (в).

Бурильна головка і долото оснащувалися АТП з підвищеною до 1100 °С термостійкістю. В зоні найбільшого термічного напруження встановлювалися тришарові підкладки під АТП, дві з яких склалися із сплаву ВК15, а третя (середній шар) – з двохміліметрового алмазовмісного матеріалу з добавками CrV_2 . Кернокалібруюча частина бурильної головки, свердловинокалібруюча частина долота і бурильної головки, а також західна частина калібратора оснащувалися породоруйнівними алмазовмісними вставками з добавками дібориду хрому.

Промислові випробування бурового долота ІНМ-АП-165,1 С проведено в Хрещищенському ВБР Кобзівського газоконденсатного родовища України, калібратора ІНМ-К-295,3 СТ в ВО "Белоруснефть", а бурильної головки ІНМ-АП-212,7/100 С в Ленінгорському УБР (Росія).

Буре долото відпрацьовувалось в інтервалі глибин 3566 – 3800 м по породах, представлених доломітами, пісковиками, аргілітами. При зносі 70 % проходка на долото становила 193 м за середньої механічної швидкості буріння 0,52 м/год. В таких же геологотехнічних умовах найкраще за показниками долото 165,1 СЗ-ГАУ (R 229) виробництва ВО "Волгабурмаш" проходило 34,7 м за середньої механічної швидкості буріння 0,33 м/год. Таким чином, одним долотом ІНМ було замінено майже 6 шарошкових доліт. При ціні шарошкового долота 8000 грн і ІНМ – 17000 грн навіть без врахування показників по механічній швидкості буріння, прибуток становив 31000 грн.

Порівняльні результати дослідних калібраторів ІНМ з добавками до вихідної шихти CrV_2 та калібраторів ІНМ, що вироблялися серійно, і Котовського заводу бурових інструментів показали такі результати.

Стійкість дослідного калібратора при зношуваності на момент складання акту дорівнювала 53,3 % – 2507 год серійного калібратора, при зношуваності 39,5 % – 797 год, а калібратори Котовського заводу при зношуваності 100 % – 395 год. Очі-

куваний ресурс роботи дослідного калібратора ІНМ становить 4686 год, а серійного – 2017 год. Таким чином, було встановлено, що за ресурсом роботи калібратори з добавками CrV_2 в 2,3 рази перевищують показники серійних калібраторів ІНМ і на порядок – показники калібраторів Котовського заводу.

Промислові випробування бурильних головок ІНМ-АП-212,7/100 С проводились в похило-спрямованих свердловинах по породах, представлених каверзними і перекристалізованими вапняками і доломітами різної твердості та абразивності. Проходка на бурильну головку становила 70 м за середньої механічної швидкості буріння 1,2 м/год і виносу керна 99 %. Показники найбільш ефективної за цих умов бурголовки К 212,7/100 ТКЗ були відповідно 7,2 м, 1,1 м/год, 94 %. Таким чином, результати роботи дослідної бурголовки за отриманими головними показниками перевищують результати найбільш ефективного інструменту.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

В дисертації з урахуванням специфіки НКМ охарактеризовано ситуацію в теорії зношування і технології виготовлення інструментів для буріння нафтових та газових свердловин. Для цього розроблено математичні моделі для дослідження кінетики зношування бурового долота і опису фізико-хімічних процесів, які відбуваються при спіканні композитів алмаз – твердий сплав ВК6 методом гарячого пресування, та запропоновано нові методи для визначення якості готових виробів. В цьому напрямку звернено увагу на дослідження математичних розв'язків та їх фізичної інтерпретації, а також рентгеноспектральне (РЕМ) і ПЕМ) вивчення структури і фізико-механічних властивостей алмазовмісного шару композита при його спіканні в умовах неізотермічного експерименту. З метою ілюстрації отриманих загальних рішень проведено аналіз цих рішень для конкретних ситуацій спікання бурових вставок і роботи інструменту при варіюванні хімічного складу композита, $p - T - t$ умов спікання, мікрогеометричних характеристик складових композита, технологічних режимів буріння, охолодження тощо. Дуже важливим є те, що розв'язки отримано в явному вигляді і їх можна використовувати для більш широкого спектра надтвердих матеріалів і інструментів. На основі отриманих результатів розроблені нові алмазовмісні матеріали, АТП та бурові інструменти на їх основі.

Узагальнюючи отримані результати, зробимо такі основні висновки:

1. Вперше розв'язано нестационарну задачу теплопровідності для алмазного бурового долота. Модель враховує інтенсивне нагрівання за рахунок тертя в зоні контакту долота – порода і охолодження рідиною внаслідок конвективного теплообміну та відміни теплофізичних властивостей НКМ від основи долота. При вирішенні цієї задачі використано метод Гальоркіна у гільбертовому просторі, що є сумою гільбертових просторів в зоні і на границі, зі спеціальним вибором координатних функцій. Вони є власними функціями спектральних задач з параметром в рівнянні і граничних умовах. Це дало змогу отримати розв'язок, який збігається до точного в середньому як в зоні, так і на її границі, що особливо важливо при моделюванні контактних задач. На основі цього розв'язку виявлено такі закономірності:

– при збільшенні коефіцієнта теплопровідності матеріалу композита від 100 до 200 Вт/(м·К) за умов екстремального буріння абразивних гірських порід відбувається зменшення температури на робочій поверхні долота до 500 °С. Подальше його зростання вже не так істотно впливає на температурний стан алмазовмісного шару композита;

– при збільшенні відносного значення коефіцієнта теплообміну від 0,5 до 3,5 кВт/(м²·К) відбувається зменшення контактної температури до 2,5 разів;

– на температуру робочої поверхні долота суттєво впливає концентрація і зернистість алмазів, контактний тиск і кутова швидкість обертання. Оптимізація цих параметрів забезпечує роботу в температурному режимі, що не перевищує 600 °С і не впливає на погіршення механічних властивостей композита;

– температурне поле в долоті істотно залежить від радіальної і кутової координат профілю.

2. Розв'язано осесиметричну задачу термопружності для сферичного долота в процесі буріння свердловин. Особливістю цієї задачі є те, що самі напруження залежать від температури нелінійно, а умови рівноваги включають компоненти вектора об'ємної сили (навантаження на долото повздовж осі O_z і обертання долота з кутовою швидкістю ω навколо цієї осі). Розв'язок задачі отримано у вигляді рядів за поліномами Лежандра і сферичними функціями. Цей розв'язок дозволив визначити складові квазістатичних термонапружень в алмазному долоті і проаналізувати основні фактори, які впливають на їх змінення. На основі цього рішення встановлено таке:

– максимальні значення радіальних температурних напружень $\bar{\sigma}_r$, тангенціальних $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ і дотичних $\bar{\sigma}_{r\theta}$ при бурінні гірських порід досягаються на границі контакту долота – порода, вони істотно залежать від радіальної і кутової координат профілю і кутової швидкості обертання ω ;

– при збільшенні відносного значення коефіцієнта теплообміну α_1 від 1,5 до 3,5 кВт/(м²·К) усі складові $\bar{\sigma}_j$ зменшуються більше ніж удвічі для всіх умов буріння;

– загальні напруження σ_j теж істотно залежать від кутової і радіальної координат, навантаження і кутової швидкості обертання. Максимальні значення загальних радіальних напружень σ_r досягаються на робочій поверхні долота при $\theta = 18^\circ$ і $\theta = 90^\circ$, а дотичні $\sigma_{r\theta}$ в цих зонах мають менші значення, ніж σ_r .

3. Розроблено науковий підхід для дослідження кінетики зношування алмазних доліт в процесі буріння нафтових і газових свердловин з урахуванням специфічних особливостей НКМ, геометричних параметрів інструментів та складних умов теплообміну внаслідок сумісної дії примусової і природної конвекції в потоці бурового розчину для загального випадку, коли коефіцієнт зносу залежить від контактної температури. Розв'язки отримано в явному вигляді, що дозволяє визначити знос чи швидкість зношування у будь-який момент буріння і виконати параметричний ана-

ліз кінетики цього процесу залежно від широкого варіювання вихідних даних. На основі отриманих рівнянь виявлено такі закономірності:

- знос бурових доліт суттєво залежить від хімічного складу алмазовмісного шару композита. Введення добавок порошків CrB_2 і W_2B_5 до вихідної шихти алмаз – твердий сплав ВК6 вдвічі підвищує зносостійкість бурового долота для всього діапазону параметрів, що вивчаються;

- збільшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу композита від 100 до 200 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ вдвічі зменшує швидкість зношування алмазного долота. Подальше збільшення цього параметра вже не так суттєво впливає на знос інструменту. Збільшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу долота практично не впливає на зносостійкість інструменту;

- стійкість бурових доліт проти абразивного зношування істотно залежить від концентрації і зернистості алмазів. Так, при зростанні відносної концентрації алмазів від $K = 75$ до $K = 100$ і зернистості від 500/400 до 1000/800 зносостійкість долота збільшується вдвічі;

- збільшення відносного значення коефіцієнта теплообміну від 0,5 до 3,5 $\text{кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ підвищує зносостійкість алмазних доліт до 2,5 разів, а збільшення контактного тиску і кутової координати, навпаки призводить до стрімкого зростання зносу інструменту.

4. Вперше розроблено кінетичну модель для опису фізико-хімічних процесів, які паралельно відбуваються при спіканні алмазовмісних композитів на основі твердосплавних матриць методом гарячого пресування для загального випадку, коли швидкість процесу контролює як дифузія, так і хімічна реакція поміж вихідними речовинами шихти. Особливістю цієї моделі є те, що швидкість процесу спікання подано добутком двох функцій: узагальненої константи швидкості і модельної функції. При цьому константа швидкості одночасно залежить від температури і тиску, вона визначає швидкість хімічної реакції в системі, що спікається, а модельна функція задовольняє умові фізичної залежності двох механізмів спікання. Це дозволяє визначити енергетичні бар'єри для зародкоутворення нових фаз, дифузії і хімічних реакцій з однієї сторони, а з іншої – визначити залежність швидкості процесу від температури і тиску та запобігти проведенню трудомістких експериментів та використанню складного обладнання при дослідженні молекулярної взаємодії. На основі цієї моделі встановлено, що енергія активації дифузії, зародкоутворення нових фаз і хімічних реакцій несе у собі повну інформацію про структури і фізико-механічні властивості НКМ.

5. Методами рентгеноспектрального аналізу (РЕМ і ПЕМ) досліджено особливості формування структури композитів системи алмаз – твердий сплав ВК6 залежно від хімічного складу і $p - T - t$ умов спікання. На основі цих досліджень встановлено таке:

- введення добавок CrB_2 і W_2B_5 до вихідної шихти алмаз – твердий сплав ВК6 сприяє підвищенню однорідності зернистої структури і фазового складу матриці,

зменшенню середнього розміру зерна WC в матриці, формуванню в матриці стискуючих напружень;

– в ямках відривання і на поверхні кристалів алмаза в зразках складу алмаз – твердий сплав ВК6 з низькою здатністю алмазоутримання, переважно трапляється завищений вміст вільного вуглецю. Характерною рисою зразків, які вміщують у вихідній шихті алмаз – твердий сплав ВК6 добавки порошоків CrB_2 і W_2B_5 , є відсутність графіту як в продуктах взаємодії алмаз – матриця, так і в матриці вдалині від цього контакту;

– поєднання дрібнозернистої структури, високої твердості, міцності контакту алмаз – матриця і зносостійкості бурових вставок, які вміщують у вихідній шихті алмаз – твердий сплав ВК6 добавки порошоків CrB_2 і W_2B_5 , свідчить про те, що хром і бор корінним чином впливають на хід дифузійних процесів і хімічних реакцій поміж компонентами, які в свою чергу відіграють найважливішу роль при формуванні структури і властивостей;

6. Виготовлено нові конкурентоспроможні на світовому ринку НКМ складу алмаз – твердий сплав ВК6, які по зносостійкості втричі перевищують стандартні композити, та спечено нові АТП термостійкість яких становить до $1100\text{ }^\circ\text{C}$ (стандартні $650\text{ }^\circ\text{C}$), що дає змогу використовувати їх при бурінні твердих абразивних порід.

7. На основі аналітичних та експериментальних досліджень розроблено високо-ефективний породоруйнівний інструмент ІНМ, який успішно впроваджено у виробництво при бурінні нафтових і газових свердловин в абразивних породах середньої твердості та верхніх інтервалах твердих порід як в Україні, так і за її межами.

Основні результати роботи викладено в наступних публікаціях:

1. Феноменологическая модель спекания сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов // Н.В. Новиков, В.А. Мечник, А.Н. Жуковский, Н.А. Бондаренко, В.Н. Ткач: Доповіді НАН України. – 2003. – № 10. – С. 102 – 104.
2. Формирование структуры и свойств сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов // Н.В. Новиков, В.А. Мечник, А.Н. Жуковский, Н.А. Бондаренко, В.Н. Ткач: Доповіді НАН України. – 2003. – № 11. – С. 88 – 90.
3. 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. 88 – 93.
4. 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.
5. 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 ВК6 // Доповіді НАН України. – 2005. – № 9. – С. 96 – 101.

6. 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 ВК6 // Доповіді НАН України. – 2005. – № 10. – С. 97 – 103.
7. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Температурное состояние алмазных буровых долот // Доповіді НАН України. – 2006. – № 10. – С. 95 – 102.
8. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Мечник В.А., Жуковский А.Н. Физико-математическое моделирование процессов спекания многокомпонентных алмазосодержащих композитов. 1. Математическая модель // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 71 – 77.
9. Физико-математическое моделирование процессов спекания многокомпонентных алмазосодержащих композитов. 2. Физико-химические особенности формирования структуры и свойств // Н.В.Новиков, Н.А.Бондаренко, О.Г.Кулик, В.А.Мечник, А.Н.Жуковский: Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, № 3. – С. 79 – 87.
10. 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 системы $C_{\text{алмаз}} - ВК6$ и $C_{\text{алмаз}} - (ВК6 - CrB_2 - W_2B_5)$ // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8, № 2. – С. 99 – 106.
11. Влияние диффузии и химических реакций на структуру и свойства буровых вставок. 2. Результаты аттестации структурного состояния сверхтвердых материалов состава алмаз – твердый сплав ВК6 // Н.В. Новиков, Н.А. Бондаренко, А.Н. Жуковский, В.А. Мечник, Г.С. Олейник: Физическая мезомеханика. – 2006. – Т.9, № 2. – С. 107 – 116.
12. Жуковский А.Н., Майстренко А.Л., Мечник В.А., Бондаренко Н.А. Напряженно-деформированное состояние связки в окрестности алмазного зерна, находящегося под действием нормальной и касательной составляющих нагрузки. Часть 1. Модель // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 2. – С. 146 – 153.
13. Жуковский А.Н., Майстренко А.Л., Мечник В.А., Бондаренко Н.А. Напряженно-деформированное состояние связки в окрестности алмазного зерна, находящегося под действием нормальной и касательной составляющих нагрузки. Часть 2. Анализ // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 3. – С. 393 – 396.
14. Бондаренко Н.А., Кулаковский В.Н., Симкин Э.С., Цыпин Н.В. Влияние свойств синтетических алмазов на механические характеристики и износостойкость твс-алю // Сверхтвердые материалы. – № 4. – С. 54 – 57.
15. Структурные особенности сверхтвердых композитов системы алмаз – твердый сплав ВК6, отличающихся износостойкостью // Н.А.Бондаренко, Н.В.Новиков, В.А.Мечник, Г.С.Олейник, В.М.Верещака: Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 6. – С. 3 – 15.
16. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Анализ основных теорий спекания материалов. 1. Спекание в изотермических и неизотермических условиях (Обзор) // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 6. – С. 3 – 17.

17. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Анализ основных теорий спекания материалов. 2. Химические реакции и процессы зародышеобразования. Общие правила для кинетического описания процессов при спекании композиционных материалов (Обзор) // Сверхтвердые материалы. – 2006. – № 1. – С. 3 – 15.
18. Бондаренко Н.А., Кулик О.Г., Мечник В.А. Исследование взаимодействия боридов CrB_2 и W_2B_5 с компонентами твердого сплава // Сверхтвердые материалы. – 2006. – № 6. – С. 30 – 36.
19. Богданов Р.К., Бондаренко Н.А., Финкельштейн Е.М., Бронников И.Д. Анализ напряженного состояния породоразрушающего элемента в ударно-стирающем режиме бурения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. ВНИИОЭНГ. – 1997. – № 2. – С. 24 – 26.
20. Бондаренко М.О. Вплив V_4C на структуру і зносостійкість бурових вставок на основі $\text{C}_{\text{алмаз}}$ – VK6 , спечених методом гарячого пресування // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – № 3. – С. 57 – 61.
21. Бондаренко М.О., Мечник В.А., Кулик О.Г. Дослідження міцності контакту алмаз – матриця та зносостійкості бурових вставок на основі VK6 з добавками CrB_2 // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – № 4. – С. 32 – 36.
22. Бондаренко М.О., Мечник В.А. Визначення теплових потоків при руйнуванні породи алмазними буровими вставками // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – № 1. – С. 47 – 49.
23. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 1. Свойства, классификация и особенности рассматриваемой проблемы // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №1. – С. 49 – 56.
24. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 2. Нестационарная задача теплопроводности для алмазного бурового долота в процессе его работы // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 2. – С. 54 – 58.
25. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 3. Анализ температурных полей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 3. – С. 87 – 90.
26. Бондаренко Н.А., Мечник В.А., Кулик О.Г. Влияние W_2B_5 на механические характеристики и износ буровых вставок, спеченных методом горячего прессования // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 5. – С. 17 – 22.
27. Бондаренко Н.А. Специфические особенности структуры и их проявление в кинетике спекания буровых вставок // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 10. – С. 38 – 45.

28. Влияние добавок CrB_2 на структуру и свойства алмазного композита на основе Fe – Cu – Ni – Sn // В.А.Мечник, Н.А.Бондаренко, О.Г.Кулик, А.Н.Жуковский, А.В.Панов, О.М.Кузьминская: Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его применения и изготовления: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2003. – С. 250 – 255.
29. Особенности распределения компонентов матрицы и их влияние на механические характеристики буровых вставок // Н.А. Бондаренко, В.А. Мечник, О.Г. Кулик, А.В. Панов, А.О. Казьмин. – Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его применения и изготовления: Сб. науч. тр. – Вып. 8. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, – 2005. – С. 28 – 32.
30. Термостойкие АТП и результаты их применения в буровых инструментах ИСМ // Л.Ф.Стасюк, М.П.Мельник, Н.А.Бондаренко, Н.Н.Мельник, В.А.Мечник: Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его применения и изготовления: Сб. науч. тр. – Вып. 9. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, – 2006. – С. 25 – 30.
31. Бондаренко Н.А., Олейник Г.С., Мечник В.А. О природе повышенного алмазодержания в композите алмаз – сплав WC – Co, полученного в добавками хромосодержащих соединений // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его применения и изготовления: Сб. науч. тр. – Вып. 9. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, – 2006. – С. 257 – 262.
32. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Мечник В.А., Супрун М.В. Технология получения износостойких породоразрушающих буровых вставок // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов. Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ НАН Украины, 2005. – Сер. Материаловедение. – С. 232 – 238.
33. Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М., Бондаренко Н.А. Исследование работоспособности долот, оснащенных АТП, при бурении геологоразведочных скважин // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые: Екатеринбург, 1999. – С. 88 – 93.
34. Пат. 63468 Україна МПК В22 F7/02, 3/12, В 32 В7/02, С04В35/52, С22С26/00. Алмазно-твердосплавна вставка / М.В. Новіков, І.Й. Рибчич, Є.І. Крижанівський, М.О. Бондаренко, В.А. Мечник, О.М. Жуковський. – Заявл. 23.04.03; Опубл. 15.08.05. Бюл. № 8.
35. Пат. 63469 Україна МПК В22 F7/02, Е21В10/46, С04В35/52, В32В7/02. Алмазно – твердосплавна пластина / М.В. Новіков, І.Й. Рибчич, Є.І. Крижанівський, М.О. Бондаренко, В.А. Мечник, О.М. Жуковський. – Заявл. 23.04.03; Опубл. 16.01.06. Бюл. № 1.
36. Пат. 64274 Україна МПК В24D3/04, В22F3/12, Е21В10/46, С22С29/14. Шихта для виготовлення абразивовмісного матеріалу / М.О. Бондаренко, В.А. Мечник,

- О.М. Жуковский, О.І. Семенов, О.В. Панов. – Заявл. 23.04.03; Опубл. 15.12.05. Бюл. 12.
37. Бондаренко Н.А. Анализ напряженного состояния полупространства горной породы в ударно-истирающем режиме бурения // Совершенствование техники и технологии бурения скважин ИСМ АН УССР: Киев, 1993. – С. 11 – 15.
 38. Исследование эффективности отбора керна бурильными головками режущего действия // Я.С. Гаврилов, Я.В. Кунцяк, Н.А. Бондаренко, Д.М. Мартынюк, Е.М. Финкельштейн: Стан і перспективи розвитку розвідувального та експлуатаційного буріння і закінчення свердловин в Україні. м. Харків, 1998. – С.75 – 76.
 39. Бондаренко Н.А. К вопросу расчета рабочих параметров в ударно-истирающем режиме бурения // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2000. – С. 53 – 55.
 40. Бондаренко Н.А., Квач В.В. Бицентричное буровое долото ИСМ, оснащенное АТП. // Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – 2001. – С. 29 – 31.
 41. Исследование механизма и кинетики спекания алмазосодержащих композиционных материалов // А.Н.Жуковский, А.Л.Майстренко, В.А.Мечник, Н.А.Бондаренко, М.Д.Левин: Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – 2002. – С. 128 – 133.
 42. Жуковский А.Н., Бондаренко Н.А., Мечник В.А. Термодинамический анализ процессов спекания породоразрушающих элементов из славутича // Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – 2002. – С. 145 – 151.
 43. Кулаковский В.Н., Днепровский А.И., Бондаренко Н.А. Метод контроля износа долота буровой машины // Сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – 2002. – С. 196 – 197.
 44. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Моделирование физических процессов при спекании // Междунар. конф. "Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике": Тез. докл., 8 – 12 сент. 2003 г., Киев, Украина. – С. 21 – 22.
 45. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Мечник В.А., Жуковский А.Н. Энергия активации процессов и кинетические параметры как мера качества алмазосодержащих материалов // Третья междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применения, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий": Труды конф. 13 – 17 сент. 2004 г., Кацевели – Понизовка. Автономная республика Крым, Украина. – С. 37 – 39.
 46. Новиков Н.В., Бондаренко Н.А., Мечник В.А., Жуковский А.Н. Моделирование зародышеобразования, диффузии и химических реакций в процессе изготовления сверхтвердых материалов методами порошковой металлургии // Труды конф. 13 – 17 сент. 2004 г., Кацевели – Понизовка. Автономная республика Крым, Украина. – С. 59 – 60.

47. Важнейшие направления в теории материаловедения сверхтвердых материалов // Н.В.Новиков, Н.А.Бондаренко, А.Н.Жуковский, В.А.Мечник, А.Л.Майстренко: Сб. материалов докладов международной научно-технической конференции "Порошковая металлургия: достижения и проблемы". 22 – 23 сент. 2005 г., Минск. – С. 79 – 80.
48. Структурные особенности алмазосодержащих композитов и их проявление в кинетике неизотермического спекания // Н.В.Новиков, Н.А.Бондаренко, А.Н.Жуковский, В.А.Мечник, А.Л.Майстренко: Сб. материалов докладов международной научно – технической конференции "Порошковая металлургия: достижения и проблемы" 22 – 23 сент. 2005 г., Минск. – С. 160 – 162.
49. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Температурное состояние долота оснащенного сверхтвердыми материалами при работе в экстремальных условиях // Четвертая междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий". 18 – 22 сент. 2006 г., Кацивели. – Крым, Украина – ИПМ АН УССР. – С. 103.

АНОТАЦІЇ

Бондаренко М.О. Наукові основи створення алмазного бурового інструменту з підвищеною роботоздатністю. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.10 – Буріння свердловин. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2007 р.

Розроблено нові теоретичні підходи для створення алмазного бурового інструменту з підвищеною роботоздатністю на основі аналітичних методів дослідження температурних полів, термопружного стану, зношування та фізико-хімічних процесів, які відбуваються при спіканні робочих елементів методом гарячого пресування. Ці підходи дозволяють визначити основні фактори, що впливають на кінетику даних процесів, спрогнозувати структуру і властивості НКМ, зносостійкість і довговічність бурових інструментів на їх основі. Проведені розрахунки енергетичного стану зразків бурових вставок складу алмаз – твердий сплав ВК6 при їх спіканні методом гарячого пресування дозволили визначити оптимальний хімічний склад і $p - T - t$ умови, за яких відбувається покращання структури і властивостей композита. На основі запропонованих моделей встановлено закономірності температурних полів, термопружного стану та кінетики зношування алмазних доліт ІНМ-214,3 Т при бурінні міцних і абразивних гірських порід для різних теплофізичних і механічних умов, що є дуже важливим для вдосконалення технології виготовлення бурових інструментів і практики їх експлуатації.

Порівняння розрахункових даних з експериментальними вказує на адекватність розроблених моделей і точність отриманих результатів.

На основі наукових досліджень розроблено конструкції бурових інструментів, які успішно впроваджені в промислове виробництво і показали результати при бурінні нафтових і газових свердловин на рівні крапих зразків закордонного виробництва.

Ключові слова: алмаз, композит, теплопровідність, напруження, зносостійкість, енергія активації, долото, калібратор, механічна швидкість буріння, проходка на долото.

Бондаренко Н.А. Научные основы создания алмазного бурового инструмента с повышенной работоспособностью. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.10 – Бурение скважин. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2007 г.

Проанализированы различные концепции и современное состояние теории износа и технологии изготовления сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов состава алмаз – твердый сплав ВК6, сложившуюся в настоящее время. Разработаны новые теоретические подходы к созданию алмазного бурового инструмента на основе аналитических методов исследования температурных полей, термоупругих напряжений, износа и физико-химических процессов, происходящих при спекании композита методом горячего прессования. Сформулированы научные направления в области сверхтвердых композитов – от качества приготовления породоразрушающих элементов, требуемой структуры и свойств до разработки конкурентноспособных на мировом рынке буровых инструментов на их основе. Для иллюстрации полученных общих решений проведен их анализ для конкретных условий работы инструмента при варьировании физико-механических свойств композита, микрогеометрических характеристик алмазов и их концентрации, сферических координат профиля, условий бурения и охлаждения.

Впервые сформулирована и решена нестационарная задача теплопроводности для полусферического тела с покрытием, из которого удален сферический сектор с центром в начале координат. Она моделирует температурное состояние алмазного бурового долота, при котором теплофизические характеристики рабочей поверхности существенно отличаются от аналогичных для корпуса долота. Модель учитывает интенсивное тепловыделение вследствие трения в зоне контакта инструмент – порода и охлаждение жидкостью за счет конвективного теплообмена. Для ее решения использован метод Галеркина в гильбертовом пространстве с разложением функций по собственным функциям спектральных задач с параметром в уравнении и граничном условии. На основе полученного решения проведен анализ зависимости температурных полей в алмазном долоте ИСМ-214,3 Т при бурении твердых и абразивных горных пород от теплофизических свойств материала композита и корпуса, микрогеометрических характеристик алмазов, относительного значения коэффициента теплообмена, режимов бурения, радиальной и угловой координат про-

филя. Полученные результаты представляют научный интерес и имеют прикладное значение для создания и анализа работы долот из сверхтвердых материалов.

Решена осесимметричная задача термоупругости для сферического алмазного долота в условиях бурения скважин. Особенностью этой задачи является то, что сами напряжения зависят от температуры нелинейно, а условия равновесия включают компоненты вектора объемной силы. Решение задачи получено в виде рядов по полиномам Лежандра и сферическим функциям, позволяет определить компоненты квазистатических термоупругих напряжений в произвольный момент времени и проанализировать основные факторы, влияющие на кинетику данного процесса. Установлено, что значения радиальных $\bar{\sigma}_r$, тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и касательных температурных напряжений $\bar{\sigma}_{\theta}$ при бурении горных пород существенно зависят от радиальной и угловой координат профиля, условий бурения и угловой скорости вращения. Выявлено, что при увеличении относительного значения коэффициента теплообмена α_1 от 1,5 до 3,5 кВт/(м²·К) составляющие температурных напряжений уменьшаются до более двух раз. Общие термоупругие напряжения σ_{ij} также зависят от сферических координат профиля и условий бурения. Максимальные значения общих радиальных напряжений σ_r достигаются на рабочей поверхности долота при $\theta = 18^\circ$ и $\theta = 90^\circ$, а касательные σ_{θ} в этих зонах имеют наименьшие значения. Общие тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ возрастают при увеличении угловой координаты θ .

Впервые решена задача износа алмазного долота с учетом тепловыделения в результате трения и специфических особенностей сверхтвердых композитов, сложных условий теплообмена за счет совместного действия естественной и вынужденной конвекции в потоке охлаждающей жидкости для случая, когда коэффициент износа зависит от контактной температуры. Решение получено в явном виде, позволяет определить износ или скорость износа в произвольный момент времени и провести параметрический анализ кинетики этого процесса в зависимости от варьирования исходных данных. Выявлено, что износ бурового долота существенно зависит от химического состава композита, коэффициента теплопроводности материала композита, концентрации и зернистости алмазов, относительного значения коэффициента теплообмена, режимов бурения и угловой координаты профиля.

Исследованы особенности формирования структуры и свойств буровых вставок состава алмаз – твердый сплав ВК6 и алмаз – твердый сплав ВК6 с добавками CrB₂ и W₂B₅. Установлено, что прочность поверхности сопряжения алмаз – матрица и свойства композитов в целом определяются характером взаимодействия и природой образующихся продуктов на поверхности сопряжения, степенью сплошности контакта алмаз – матрица и природой напряженного состояния матрицы, окружающей алмазы. Показано, что введение CrB₂ и W₂B₅ в исходную шихту алмазосодержащего слоя буровой вставки при их спекании по оптимизированным режимам способствует гомогенизации зеренной структуры и фазового состава матрицы, уменьшению среднего размера зерен WC, формированию в матрице напряжений, сжимающих

частицы алмаза, а также предотвращает выделение неалмазного углерода в продуктах взаимодействия алмаз – твердый сплав. Эти факторы способствуют повышению износостойкости буровых вставок и долот в целом более 2 раз за счет повышения свойств алмазодержания и абразивных характеристик алмазосодержащего слоя композита.

Впервые разработана математическая модель для описания физико-химических процессов, которые параллельно происходят при спекании алмазосодержащих композитов на основе твердосплавных матриц для общего случая, когда скорость процесса контролируется как диффузией, так и химической реакцией. Показано, что комплексное применение известных и предложенной моделей с использованием методов рентгеноспектрального анализа позволяет глубже исследовать кинетику физико-химических процессов на различных этапах спекания и выявить основные факторы, влияющие на их протекание. Предложено в качестве меры качества готовых изделий принять энергии активации процессов, зародышеобразования новых фаз, химических реакций между компонентами и кинетические параметры процесса спекания. Статистическая достоверность опытных и модельных расчетов свидетельствует о адекватности модели и точности полученных результатов.

На основании полученных результатов разработаны конкурентоспособные на мировом рынке сверхтвердые композиционные алмазосодержащие материалы и буровые инструменты на их основе.

Ключевые слова: алмаз, матрица, добавка, композит, теплопроводность, температура, напряжение, износостойкость, кинетика, спекание, диффузия, зародышеобразование, химическая реакция, энергия активации, константы кинетические и физические, долото, калибратор, механическая скорость бурения, проходка на долото.

Bondarenko N.A. The scientific principles of making the diamond drilling tools with increased efficiency. – Manuscript. Thesis for the Doctor of Technical Sciences degree in the speciality 05.15.10 – Drilling of wells. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2007.

The new theoretical approaches have been developed of making the diamond drilling tools with increased efficiency based on the analytical methods of investigating the temperature fields, thermoelastic stress, wear and physico-chemical processes taking a place during the hot pressing of working bits.

These approaches allow to detect the leading factors influencing the kinetics of the given processes and to predict the structure and properties of superhard composite materials, wear resistance and durability of drilling tools equipped with them.

The energy state calculations conducted of drilling inserts made of diamond and WC-6Co hard alloy by hot pressing made it possible to determine the optimal chemistry and $p - T - t$ conditions providing improvement of structure and properties of composite.

Using the proposed models, the patterns have been established of temperature fields, thermoelastic stress and wear kinetics of IHM-214,3T diamond drills under the conditions

of hard and abrasive rock drilling for various thermal and mechanical situations being crucial for production technology of these tools and their running practice.

Comparison of calculated and experimental data indicates adequateness of the developed models and accuracy of the obtained results.

Based on the scientific investigations, the drilling tools have been designed and applied successfully in industry for the oil and gas well drilling and have shown the results at the level of the best foreign-made tools.

Keywords: diamond, composite, thermal conductivity, stress, wear resistance, activation energy, drill bit, calibrator, mechanical drilling speed, sinking per drill.

НТБ
ІФНТУНГ



as1130