

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ІМ. В. М. БАКУЛЯ

на правах рукопису

СТЕПАНОВ ІГОР ГЕНАДІЙОВИЧ

УДК 620.178.16:620.22

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ КІНЕТИКИ ЗНОШУВАННЯ
АЛМАЗОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ, ОДЕРЖАНИХ МЕТОДОМ ПРОСОЧУВАННЯ.

Спеціальність 05.02.01 - "Матеріалознавство в машино-
будуванні (промисловість)".

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступіня
кандидата технічних наук

Київ - 1994



AB 30.930

Роботу виконано в Інституті надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля (м. Київ)

Наукові керівники: - академік, доктор технічних наук,
професор
Новиков Микола Васильович
- доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Майстренко Анатолій Львович

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Ляшенко Борис Артемович
- кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Караулов Олександр Кирилович

Провідна установа: НІІ Гіпронафта (м. Київ)

Захист відбудеться "20" вересня 1994р. в 13³⁰ годин
на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради Д 016.10.01
в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля за адресою:
254074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту.
Відгуки, заповіднені печаткою, просимо надсилати на адресу
Спеціалізованої Вченої Ради

Автореферат розіслано "19" вересня 1994р.

Вчений секретар
Спеціалізованої Вченої Ради,
доктор технічних наук

А. Л. Майстренко

Актуальність досліджень: Композиційні алмазовмісні матеріали (КАМ), одбуті методом інфільтрації (просочування) міddю отформованої алмазовмісної вольфрамкобальтової матриці, широко використовуються для оснащення робочих елементів геологорозвідних бурових коронок, що дозволяє значно підвищити ефективність геологорозвідного буріння. В зв'язку з тим, що ефективність алмазного буріння визначається, в першу чергу, зносостійкістю КАМ, актуальною задачею сучасного матеріалознавства є дослідження особливостей зношування таких матеріалів під дією абразиву, опис закономірностей цього явища, а також визначення основних факторів, дозволяючих керувати зносостійкістю матеріалів даного класу.

Робоча поверхня бурових коронок завязує інтенсивного впливу контактної тиску та високих температур. Характер зношування поверхні при цьому визначається особливостями механічних та фізико-хімічних процесів, які мають місце в зоні тертя. Тому для повного опису зношування КАМ при контактуванні з гірською породою необхідно провести комплексні дослідження явищ пошкодження на поверхні зношування, що дозволить виділити основні процеси, які визначають характер та швидкість зношування КАМ, формалізувати їх, а також розробити метод оцінки та прогнозування зносостійкості алмазних композитів на основі фізико-механічних властивостей їх компонентів.

Мета роботи: Вияв закономірностей зношування КАМ в процесі буріння та розробка методу прогнозування швидкості зношування й оцінки зносостійкості композитів на основі фізико-механічних властивостей їх компонентів.

Наукова новизна роботи:

В результаті проведення комплексних досліджень явищ пошкодження робочої поверхні бурової коронки визначено механохімічну природу зношування матриці КАМ. Визначено температурні режими контактної взаємодії з гірською породою, при яких мають місце механічна або механо-хімічна форми абразивного зношування: при температурі приповерхневих шарів матриці менш ніж 200°C преважує зношування матеріала шляхом викришення під дією тріщин втоми, а при нагріві до 380...400°C домінують процеси механохімічного зносу у вигляді інтенсивного утворення та руйнування тонкої крихкої оксидної плівки на робочій поверхні.

Вперше побудовано експериментальні кінетичні діаграми втомленісного руйнування КАМ. Визначено, що найбільш слабкою ланкою при втомленісному руйнуванні алмазних композитів є межа поділу алмаз-матриця. Показано, що при підвищенні об'ємної концентрації алмазів в КАМ від 0 до 37,5% величина порогового коефіцієнту інтен-

сильності напружень K^* , який відповідає швидкості росту втомленісної тріщини 10^{-7} м/цикл, знижується в 3,1 рази. Показано, що при забезпеченні міцного адгезійного зв'язку по межі поділу за рахунок металізації алмазів молібденом величина K^* в КАМ з об'ємною концентрацією алмазів 25% підвищується в 1,8 раз.

Встановлено, що структурним фактором, визначаючим температуру робочої поверхні матриці КАМ при контактній взаємодії з гірською породою, є умови теплопередавання по межі поділу алмаз-матриця. Показано, що при зміні теплоспроводності перехідного шару, умовно введеного по межі поділу для моделювання теплового контакту алмаза та матриці, від 1 (дискретний контакт між компонентами) до 150 Вт/м²К (металізований прошарок молібдена на алмазі) температура робочої поверхні матриці змінюється від 130° до 420°С.

Розроблено метод, який дозволяє прогнозувати швидкість зношування КАМ на основі фізико-механічних властивостей їх компонентів та з врахуванням технології виготовлення матеріала.

Практична цінність та реалізація роботи:

Проведені дослідження дали змогу розробити підхід, який дозволяє прогнозувати зносостійкість КАМ та здійснювати науково обгрунтований вибір складу матриці алмазосмісного композита для одержання матеріалів з оптимальною швидкістю зношування.

Результати досліджень використані при атестації інструменту для металообробки, впровадженого на Чернігівському заводі автовапчастин, а також при обгрунтуванні технічних умов металізації алмазів, використовуваних для оснащення бурового інструмента.

Особистий внесок автора становить:

- вибір методик та аналіз результатів дослідження стану робочих поверхневих шарів матриці КАМ після контактування з гірською породою та продуктів зношування композита;

- розробка методики дослідження циклічної тріщиностійкості КАМ, проведення експериментів та аналіз одержаних результатів;

- розробка моделі та формулюванні граничних умов для рішення плоскої задачі стаціонарної теплоспроводності та проведення розрахункового моделювання розподілу температур в КАМ при бурінні гірської породи;

- вибір методик та аналіз результатів дослідження фізико-хімічних явищ в КАМ при нагріві;

- проведення експериментальних досліджень КАМ різного складу та структурного стану на знос;

- розробка методики прогнозування кінетики зношування КАМ;

- аналіз та узагальнення результатів проведених досліджень.

Достовірність наукових результатів підтверджується великим

обсягом проведених експериментальних досліджень в використанні сучасних методик та обладнання, а також доброю відтворюваністю результатів.

Апробація роботи: Основні положення дисертаційної роботи доповідались на XVI, XVII конференціях молодих вчених ІМН НАН України "Получение, исследование свойств и применение сверхтвердых и тугоплавких материалов" (Київ, 1991, 1992); на науково-технічній конференції "Качество и надежность условий трения" (Хмельницький, 1992); на науковому семінарі "Комп'ютерне моделювання теплових процесів в елементах конструкцій" (Алушта, 1993); на II міжнародному симпозіумі з трибології (Гомель, 1993); на VIII міжнародній конференції з механіки руйнування "ICF-8" (Київ, 1993).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 9 друкованих робіт.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та загальних висновків, викладена на 167 сторінках машинописного тексту, містить 55 ілюстрацій, 9 таблиць. Біографія вміщує 104 джерела.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ:

У вступі зазначені причини, що обумовлюють актуальність роботи, приведено зміст роботи, ціль досліджень та основні положення, які вносяться на захист.

В першому розділі проведено аналіз основних видів пошкодження контактної поверхні матеріалів пар тертя, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Описано механічні та фізико-хімічні процеси, які можуть мати місце в зоні тертя, а також відповідні їм остаточні зміни геометрії, структури та властивостей робочої поверхні. Розглянуто методи опису та прогнозування характеристик зношування для різних матеріалів і сплавів. Аналіз літературних даних показує, що існуючі моделі зношування, які базуються на різних гіпотезах про природу пошкодження поверхні тертя, мають обмежене застосування в конкретних умовах і різний ступінь достовірності. Тому для коректного визначення характеристик зношування конкретного матеріала необхідно проведення комплексних досліджень стану його поверхні, а також виділення основних процесів, обумовлюючих швидкість зносу поверхні.

Результати експериментальних досліджень зношування КАМ гірською породою приведені в роботах Арцимовича Г.В., Бугайова О.О., Вовчановського І.Ф., Богданова Р.К., Лівшица В.Н., Ципіна Н.В.. Вивчено впливання параметрів навантаження, охолодження та геометрії інструмента на зносостійкість КАМ. Приведено кількісні залежності швидкості зношування алмазних композитів від властивостей

гірських порід та охолоджуючої рідини. На основі експериментальних досліджень здійснено вибір оптимального складу матриць, концентрації й зернистості алмазів в КАМ. Але стан робочого поверхневого шару матриці, а також процеси, які мають місце в зоні контакту КАМ в абразивом дослідженні не повністю. До цього часу зношування матриці розглядалось, в основному, як результат чисто механічної дії абразивних частинок, тобто мікрорізання (зняття мікростружки).

Але відомо, що мікрорізання це далеко не єдиний вид абразивного зношування. Так, в роботах Костецького В.І. встановлено, що зношування поверхні абразивними частинками може проявлятися або в формі механічного (мікрорізання, контактна втома...) або в формі механохімічного (окислення робочої поверхні та руйнування окисної плівки) аносу матеріала. Виявлено умови, при яких превалює та чи інша форма.

Питання зношування алмазного інструмента під дією температур розглянуті в роботах Аленкоєвського В.А., Резникова О.М., Чеповецького І.Х., Шило А.Є. Особливості руйнування алмазів в процесі тертя розглянуті Вокучавою Г.В., Лоладзе Т.Н., Масловим Є.М. Дослідженням впливу міцності алмазовдержання на працездатність алмазов-абразивного інструмента займались Коновалов В.А., Мішнаєвський Л.Л. Результати досліджень впливу міцності та дефектності алмазних компонентів на їх стійкість в інструменті приведено в роботах Новикова М.В., Майстренко А.Л., Кулаковського В.М.

Але одержані результати не дозволили встановити закономірності зношування КАМ, виділити й прогнозувати основні процеси, які визначають характер та швидкість руйнування поверхні тертя.

Для вивчення особливостей зношування КАМ й розробки методу прогнозування швидкості цього явища вирішувались наступні наукові та прикладні задачі:

1. Проведення комплексних досліджень стану контактної поверхні КАМ в процесі буріння.

2. Визначення закономірностей зношування КАМ і виявлення домінуючих процесів, що визначають характер руйнування робочої поверхні матеріала.

3. Чисельне дослідження поля температур в робочих елементах бурового інструмента з КАМ. Дослідження впливу температур на характер окислення КАМ.

4. Дослідження особливостей втомленісного руйнування КАМ.

5. Розробка методу прогнозування швидкості зношування КАМ та оцінки їх зносостійкості на основі фізико-механічних властивостей їх компонентів.

Другий розділ присвячений опису сучасних методик, які викорис-

товуються в роботі. Описано методики дослідження стану робочих поверхневих шарів матриці КАМ, залишкових механічних та фізико-хімічних явищ в матеріалі після контакту з гірською породою, а також аналізу продуктів зношування. Проведені дослідження дозволили виявити домінуючі процеси зношування КАМ.

Розглянуто розрахункові та експериментальні методики моделювання процесів втомленісного руйнування алмазних композитів і температурного окислення матриці, що дозволило провести опис основних закономірностей зношування КАМ. Об'єктом дослідження особливостей зношування вибрано многосекторні геологорозвідні бурові коронки типу БС, а також лабораторні призматичні зразки з КАМ розміром 5*5*35 мм.

Вивчення механічних явищ в робочих поверхневих шарах матриці проведено за допомогою методів: металографічного аналізу в використанні оптичної мікроскопії (дослідження виконано разом з Лінник Г.Н., ІНМ НАНУ), склерометрії (дослідження виконано разом з Варюкно В.В., Університет міської авіації (м.Київ)); а також рентгенівського "sin²ψ"-методу (разом з Кунінін Я.І., Інститут абразивного шліфування (м.Санкт-Петербург)). При цьому визначені: залишкова пористість й тріщинуватість поверхні; залишкові напруження та розподіл мікротвердості на рівній глибині під робочою поверхнею.

Явища поверхневої фізико-хімії досліджені методами оже-спектроскопії (разом з Куценковим С.П., ІНМ НАНУ), відновлючої екстракції в потоці інертного газу (разом з Гарбузом В.В., Інститут матеріалознавства ім.Францевича І.Н., ІНМ НАНУ (м.Київ)), електронної мікроскопії (разом з Ващенко О.М., ІНМ НАНУ). Досліджено фазовий стан поверхні зносу, концентрацію кисню та товщину окисидної плівки, яка утворюється на поверхні матриці при бурінні.

Аналіз хімічного складу, розмірів та форми продуктів зношування матриці, які містяться в буровому шламі, проведено за допомогою електронної мікроскопії.

Моделювання втомленісного руйнування алмазних композитів проведено за допомогою методики дослідження циклічної тріщиностійкості надтвердих матеріалів, яка базується на вимірній швидкості росту тріщин в лабораторних зразках під дією циклічного навантаження на трьохточечний згин (методику для дослідження твердих сплавів розробив Чеповецький Г.І., ІНМ НАНУ). Ця методика була доповнена й розширена для дослідження алмазних композитів.

Як відомо, магістральна тріщина в КАМ просувається від зерна до зерна, прискорюючи швидкість розповсюдження безпосередньо навколо зерна. Тому в алмазних композитах дуже важко проводити заміри

її росту за допомогою візуальних спостережень, як це було впроваджено при дослідженні твердих сплавів. Але при проведенні експериментів встановлено, що довжина тріщини у зразку з КАМ і величина його прогину зв'язані між собою залежністю:

$$(L_n/L_{n-1}) - (F_n/F_{n-1})^{3/2} \quad (1)$$

де L_n , L_{n-1} - довжина тріщини; F_n , F_{n-1} - величина прогину зразка в КАМ. Цей вираз справедливий при: $L_n < 0,6H$; $(L_n/L_{n-1}) < 1,5$, де H - висота зразка. Тому для проведення замірів довжини тріщин система була доповнена пристроєм для заміру прогину.

Результати експериментів представлені в вигляді кінетичних діаграм втомленісного руйнування (рис.1,2).

Для чисельного дослідження поля температур в КАМ при контактній взаємодії з гірською породою вирішувалась плоска задача стаціонарної теплопроводності за допомогою універсального пакету програм МКЕ "Термопружність" (дослідження виконані разом з Анісінін О.М., ІНМ НАНУ). Розподіл температур розраховували поетапно за допомогою метода самоадагдованого поля для сегмента бурової коронки в цілому та для виділеного фрагменту алмаз-матриця. Тепловий потік на робочій поверхні розраховували за відомими співвідношеннями Рєзнікова О.М. (з припущенням, що 80% теплового потоку надходить на ріжучу частину алмазів, контактуючих з гірською породою), а тепловіддачу задавали як результат дії конвективного теплообміну. Рєперну температуру у виділеному фрагменті визначали по результатах рішення задачі для робочого сегмента коронки. При проведенні розрахунків прийняте припущення, що буріння проводиться в нормальному режимі по коростишевському граніту та при охолодженні водою.

При дослідженні розподілу температур в КАМ при бурінні теплопроводність алмазів змінювали від 300 Вт/м²К (для реальних синтетичних алмазів, які використовують для оснащення бурових коронки) до 1200 Вт/м²К (для термостійких алмазів, які зберігають властивості та форму при нагріві). В широкій межі змінювали також теплопроводність матриці (50...400 Вт/м²К). Для моделювання теплообміну по межі поділу алмаз - матриця умовно введена тонка оболонка (перехідний шар), товщина якої 0.05 діаметра алмазного зерна. Теплопроводність перехідного шару змінювали від 1...10 Вт/м²К (для дискретного контакту по межі поділу при чисто механічному обтиску алмазів матрицею) до 150 Вт/м²К (для ідеального теплового контакту при наявності адгезійного зв'язку між компонентами).

Аналіз термохімічних процесів, які мають місце в матриці при нагріві, проведено за допомогою методів ділатометрії (разом з Супрун В.І., ІНМ НАНУ), диференціального термічного аналізу (разом з

Корабльовим С.Ф., ІНМ НАНУ), рентгенівського кількісно-фазового аналізу (разом з Іваськевичем Я.В., ІНМ НАНУ). Досліджено становище поверхні мідьвмістивної матриці при нагріві в діапазоні температур 20-900° С, визначені температури інтенсивного окислення та горіння композита, визначена швидкість утворення оксидної плівки на його поверхні при нагріві.

Третій розділ присвячений опису та аналізу результатів комплексного дослідження стану поверхневих шарів матриці КАМ після контакту з гірською породою.

Як відомо, при зносі мікрорівнянням на поверхні матеріалів партертя обов'язково мають місце явища деформаційного наклепу, тобто повинні змінюватися механічні властивості приповерхневих шарів. Але при дослідженні матриці встановлено: - що розбіг мікротвердості, зумовлений рівнорідністю матеріалу (до складу матриці входять мідь, кобальт, карбіди вольфраму), становить 440...1300 МПа і не змінюється при зношуванні, як не змінюється й середня величина мікротвердості (810...840 МПа); - поверхнева пористість становить 0,2% й не змінюється при зносі; - залишкові напруження в стискаючими та їх розбіг по глибині робочої та вихідної поверхні не перебільшує 6%. На підставі перерахованих факторів зроблено висновок, що помітних змін механічних властивостей (характерних для мікрорівняння) в поверхневих шарах матриці при зношуванні не відбувається.

При дослідженні бурового шламу виявлено великі частинки зносу матриці товщиною 3...30 мкм з наявними слідами втомленісного руйнування, що є свідцтвом про процеси фрагментарного викришування матеріалу під дією втоми (як відомо, - кожному виду зношування відповідає рівна форма частинок зносу). Цей висновок підтверджується результатами металографічних досліджень. Так, при дослідженні бокових шліфів в лабораторних зразках під зоной тертя виявлено велику кількість тріщин втомленісного типу, які беруть початок поблизу острих кутів алмазних зерен на глибині 40...80 мкм та виходять на поверхню матриці. Тріщини зароджуються на межі поділу алмаз-матриця, а поблизу поверхні відбувається їх витвіління. Зроблено висновок, що в процесі буріння відбувається циклічне навантаження алмазів, зародження втомленісних тріщин на межі поділу та їх розповсюдження по матеріалу матриці. Наслідком цього є фрагментарне викришення матриці, оголення виступаючих на поверхню алмазів та їх вивалювання під дією дотичного навантаження, як це було показано в роботах Мішнавського Л.Л. Тобто, механічне зношування КАМ визначається характером зародження та розвитку втомленісних тріщин на межі поділу алмаз-матриця.

При дослідженні фізико-хімічних явищ на робочій поверхні мате-

ріалу після контактування в гірській породі виявлено значну кількість оксидів міді (в тонких шарах робочої поверхні), що є свідомством про інтенсивні процеси окислення, які мають місце в зоні тертя. Досліджено стан, як вихідної поверхні, так і робочої. Визначено, що концентрація кисню на поверхні вихідного спеченого композиита, зумовлена атмосферним окисленням, не перебільшує 8...10% і спостерігається лише в шарі 0,05 мкм. В той же час на поверхні зносу визначено пористу плівку оксидів товщиною до 0,5 мкм. Як відомо, оксиди міді дуже крихкі, на межі поділу оксиду й основного матеріалу зв'язок слабкий. Тому вся оксидна плівка може легко руйнуватися абразивними частинками, тобто механо-хімічне зношування матеріалу визначається процесами утворення та руйнування крихкої пористої оксидної плівки на робочій поверхні матриці.

Таким чином, аналіз результатів дослідження стану робочої поверхні матриці КАМ після контактування з гірською породою дозволив визначити механо-хімічну природу абразивного зношування матеріалу. Визначено, що абразивне зношування алмазних композитів є сукупністю двох одночасно діючих процесів: фрагментарного викришування матеріалу під дією втомленісних тріщин та руйнування абразивними частинками крихкої пористої оксидної плівки, яка інтенсивно утворюється на робочій поверхні при контакті з гірською породою.

Четвертий розділ присвячений спису результатів моделювання процесів, які визначають характер та швидкість абразивного зносу КАМ: температурного окислення та втомленісного руйнування. Аналіз цих результатів дозволив розробити метод прогнозування швидкості механічного та механо-хімічного зношування композитів й оцінки вносостійкості КАМ.

При дослідженні втомленісного руйнування КАМ визначено, що найбільш слабкою ланкою в композиті є межа поділу алмаз-матриця. В алмазних композитах, одержаних методом просочування міддю алмазовмісної матриці, алмазовдержання здійснюється шляхом механічного обтиску алмазів матеріалом матриці, адгезійний зв'язок між компонентами відсутній, а на межі поділу мають місце розшарування (псевдопори). Тому в таких матеріалах магистральна тріщина втомленості розвивається стрибкообразно від зерна до зерна, прискорюючи свій розвиток на межі поділу алмаз-матриця. При підвищенні концентрації алмазів в КАМ підвищується псевдопористість матеріалу й значно знижується його циклічна тріщиностійкість. Наприклад, при підвищенні об'ємної концентрації алмазів в КАМ від 0 до 37,5% величина порогового коефіцієнту інтенсивності напружень K_* , який відповідає швидкості росту втомленісної тріщини 10^{-7} м/цикл, знижується в 3,1 рази (рис.1). При цьому швидкість зростання тріщини в

КАМ на 2 порядки вище, ніж в матриці при тих же навантаженнях і сягає величини одного порядку із швидкістю аносу.

Оскільки характеристики циклічної тріщиностійкості та швидкість втомленісного руйнування КАМ в значній мірі залежать від міцності зв'язку алмазу й матриці, були проведені іспити матеріалів, армованих синтетичними алмазами з молібденовим покриттям, яке забезпечує міцний адгезійний зв'язок матриці з зерном за рахунок утворення карбідного шару по межі поділу (металізацію алмазів виконав Бондарь І.В., ІНМ НАНУ).

Визначено, що в цьому випадку при підході втомленісної тріщини до алмазного зерна спостерігається значне гальмування її розвитку, що зумовлено високою міцністю зв'язку алмаза з матрицею. Розвиток тріщини характеризується періодом накопичення пошкоджень на межі поділу. Цей період залежить від цілісності алмазів і може сягати 400000 циклів навантаження, тобто швидкість відшаровування металізованого алмазу від матриці майже в 50 разів нижче, ніж неметалізованого. В цьому випадку значно підвищується циклічна тріщиностійкість композитів. Наприклад, при забезпеченні міцного адгезійного зв'язку по межі поділу за рахунок металізації алмазів молібденом величина K_{IC} в КАМ з об'ємною концентрацією алмазів 25% підвищується в 1.6...1.8 раз (рис.2).

Таким чином, зроблено висновок, що характер і швидкість втомленісного руйнування КАМ залежать, в першу чергу, від типу зв'язку по межі поділу алмаз - матриця, а циклічна тріщиностійкість значно підвищується при забезпеченні адгезії між компонентами.

При дослідженні теплового поля в робочих елементах бурового інструменту визначено, що розподіл температур в матриці КАМ при контакті з гірською породою відбувається по експоненціальному закону, найбільша температура спостерігається в тонких поверхневих шарах матеріалу. Визначено, що нагрів матриці визначається, в першу чергу, умовами теплопередачі по межі поділу алмаз - матриця. Наприклад, температура поверхні матриці КАМ з механічним обтиском алмазів при бурінні в нормальному режимі не перебільшує 180° С (рис.3). В той же час, наявність по межі поділу алмаз - матриця молібденового металізованого шару, який забезпечує адгезію і надійний тепловий контакт між компонентами, приводить до нагріву поверхні матриці до 400...420° С. Така різниця пояснюється тим, що у випадку дискретного теплового контакту між компонентами, тепловий потік, поступаючий на ріжучу кромку алмаза, виступаючого на поверхню, майже повністю замикається безпосередньо у зерні, що приводить до його перегріву (на межі поділу спостерігається великий перепад температур), а у випадку суцільного теплового контакту між

компонентами відбувається рівномірний температурний розподіл між ними.

При дослідженні процесів окислення КАМ при нагріві на повітрі визначено, що поверхня матриці починає помітно окислюватися вже при температурі 200°C (рис.4). В діапазоні температур $380^{\circ}\dots 400^{\circ}\text{C}$ починається інтенсивне окислення, тобто швидке утворення крихкої пористої оксидної плівки на поверхні матеріалу. У цьому випадку швидкість утворення плівки окислів є величиною одного порядку із швидкістю зносу композита. Із аналізу температурного розподілу в КАМ зрозуміло, що такі процеси при бурінні в нормальному режимі можуть мати місце лише в матеріалах з адгезійним зв'язком і лише в малих шарах поверхні.

Таким чином, проведені дослідження дозволили розробити досить простий метод прогнозування швидкості зносу алмазних композитів, одержаних методом просочування. Так, визначено, що швидкість абразивного зносу КАМ визначається швидкістю механічного та механохімічного зношування, тобто швидкістю розповсюдження тріщин втомі та утворення поверхневої оксидної плівки:

$$I = f(V_m., V_m.x.) = f(dL/dN, dh/dt), \quad (2)$$

де I - лінійна швидкість абразивного зносу КАМ; $V_m.$ - інтенсивність механічного зношування матриці, тобто швидкість проростання втомленісних тріщин в матеріалі (dL/dN); $V_m.x.$ - інтенсивність механохімічного зношування матриці, тобто швидкість утворення та руйнування крихкої оксидної плівки на її поверхні при нагріві (dh/dt).

Для прогнозування лінійної швидкості механічного зношування алмазних композитів $V_m.$ (мм/хвил.) запропоновано досить простий аналітичний вираз, в основу якого покладена відома формула С.Я.Яреми для опису середнього прямолінійного інтервалу кінетичної діаграми втомленісного руйнування:

$$V_m. = 10^{-7} \omega (K_{max} / K^*), \quad (3)$$

де ω - швидкість обертання інструменту (об./хвил.); K_{max} - поточна максимальна величина коефіцієнту інтенсивності напружень циклу (розрахункові величини K_{max} для деяких типів навантаження інструменту описані в роботах В.М. Кулаковського); n, K^* - величини, які визначені на основі аналізу експериментальних діаграм втомленісного руйнування КАМ (табл.1); 10^{-7} (м/цикл) - прийнята в літературі швидкість зростання втомленісної тріщини, яка використовується для спису втомленісних діаграм. Оскільки алмази композити при бурінні працюють в умовах циклічного навантаження, є підстави зробити висновок, що при кожному оберті інструмента численні тріщини втомі проставляють вглиб матеріалу і приводять до фрагментарного викри-

шення його поверхні.

Прогнозування швидкості механохімічного зношування композитів $V_{м.х.}$ (мкм/хвил.) може бути проведено за допомогою кінетичних діаграм зростання поверхневої оксидної плівки та аналізу результатів чисельного дослідження розподілу температур в матриці при контактуванні з гірською породою. Оскільки оксидна плівка, яка утворюється на робочій поверхні матриці дуже пориста, крихка й легко може руйнуватися абразивом можна зробити висновок, що швидкість її зростання та руйнування равни між собою. Тоді, знаючи температуру робочої поверхні матриці, досить легко визначити швидкість $V_{м.х.}$

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що фактором, визначаючим характер абразивного зношування КАМ, є температура робочої поверхні матриці. Визначено, що коли температура матриці нижче порога початку окислення (для композитів з мідним просочуванням це інтервал близько 200°C), інтенсивних процесів окислення не відбувається і домінує механічна форма зношування. В тому випадку, коли температура робочої поверхні композита сягає інтервалу інтенсивного окислення ($380^{\circ}\dots 400^{\circ}\text{C}$), відбувається швидке зростання поверхневої оксидної плівки, а також значно підвищуються пластичні властивості матриці (як відомо, межа втомленості мідних сплавів при таких температурах зростає в 2...3 рази), і зародження тріщин стає майже невірогідним. Тому при таких температурах домінує механохімічна форма абразивного зношування.

На основі аналізу проведених досліджень визначено, що температура робочої поверхні КАМ, одержаних методом просочування міддю, при бурінні в нормальному режимі залежить, в першу чергу, від типу зв'язку між компонентами. З цього можна висновити, що характер зношування також визначається саме цим структурним фактором. Так, при зношуванні композитів з механічним обтиском алмазів матрицею (без адгезійного зв'язку між компонентами), домінують процеси механічного (втомленісного) руйнування поверхні, що обумовлено відсутністю інтенсивного окислення та слабкою міцністю зчеплення алмаза з матрицею. При зношуванні КАМ, зрмованих синтетичними алмазами з молібденовним покриттям (адгезійний зв'язок між компонентами), домінують процеси механохімії (зростання та руйнування поверхневої оксидної плівки), що обумовлено інтенсивними процесами окислення, підвищенням пластичності при нагріві та високою міцністю зчеплення алмаза з матрицею.

Як відомо, деякі властивості композиційних матеріалів є дуже чутливими до типу зв'язку між компонентами. Наприклад, при проведенні досліджень по методу стягування теплового потоку визначено, що величини теплопроводності КАМ з адгезією між компонентами знач-

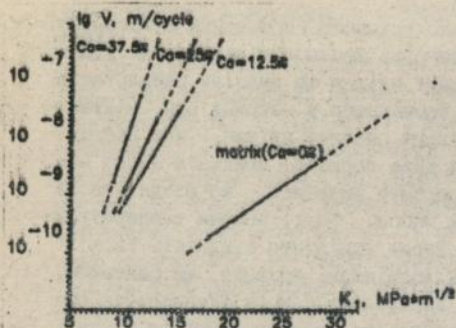


Рис.1. Вплив концентрації синтетичних алмазів на циклічну тріщиностійкість КАМ соотаву ВКВ+мідь+АСВО

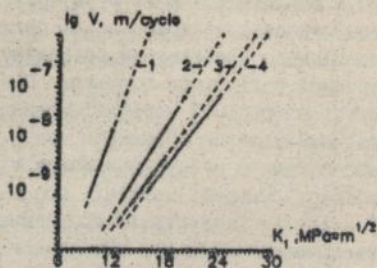


Рис.2. Вплив типу зв'язку між компонентами на циклічну тріщиностійкість КАМ: 1-механічний зв'язок 2,3,4-адгезія (відношення маси металізованого Мо до маси алмазів: 2-0.34; 3-0.177; 4-0.88)

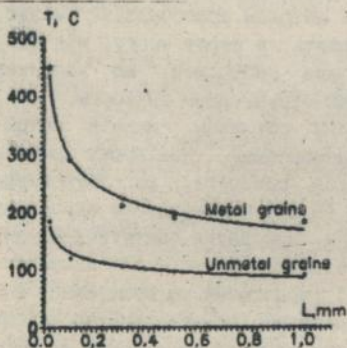


Рис.3. Розподіл температур на робочій поверхні матриці КАМ при бурінні.

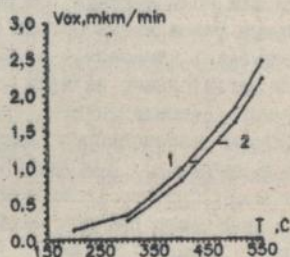


Рис.4. Швидкість утворення оксидної плівки на поверхні матриці при нагріві КАМ, просочених: 1-міддю, 2-латунню.

Табл.1. Основні параметри, які описують кінетичні діаграми втомленісного руйнування КАМ.

Матеріал	Тип зв'язку між компонентами	Відношення маси M_0 до маси АСВ0	n	$K \cdot \frac{M \cdot \Delta \sigma}{\sqrt{V}}$
ВКБ+мідь+АСВ0 250/200	механічний	0.	7,99	15,8
	адгезія	0,077	6,22	29,1
	адгезія	0,168	6,32	27,8
	адгезія	0,34	6,7	24,4

Табл.2. Прогнозування швидкості зношування КАМ.

Матеріал		ВКБ+АСВ0 250/200		
Просочування		міддю	міддю	латунню Л70
		алмази металізовані		
Теплопровідність (Вт/м*К)	матриці	132	132	114
	композита	88	159	128
Тип зв'язку між компонентами		механічний	адгезія	адгезія
Режим навантаження		P-8МПа V-2,1м/с		
Температура поверхні (°C)		<200	418	406
Домінуючі процеси зношування		втомленісне викришення	руйнування оксидної плівки	руйнування оксидної плівки
швидкість зношування (мм/хвил)	прогноз	3,78	1,34	1,08
	експеримент	4,8±0,7	1,8±0,4	1,6±0,5

но вище ніж величини теплопроводності матриці, а при відсутності адгезійного зв'язку опостерігається значне падіння теплопроводності композиту відносно матеріалу матриці (дослідження виконані разом з Подобой О.П., ІНМ НАНУ). Тому при розробці методу прогнозування швидкості зношування КАМ величина теплопроводності була використана, як критерій для оцінки типу зв'язку між компонентами композита.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє прогнозувати швидкість зношування та проводити оцінку зносостійкості КАМ, які працюють в конкретних умовах нормального режиму буріння, на основі фізико-механічних властивостей матеріалу: 1. швидкості утворення поверхневої оксидної плівки при нагріві (якщо температура робочої поверхні матриці досягає інтервалу інтенсивного окислення); 2. швидкості втомленісного руйнування (якщо температура матриці нижче інтервалу початку окислення, тобто теплопроводність КАМ нижче теплопроводності матриці (відсутність адгезії між компонентами)).

Приклад застосування цього підходу для прогнозування лінійної швидкості зношування алмазних композитів, одержаних методом просочування, приведено в таблиці 2. Приведено прогнозування для КАМ різної структури (різний матеріал просочування, з механічним та адгезійним зв'язком між компонентами), які працюють в рівних умовах навантаження (нормальний режим буріння по коростивевському граніту при охолоджуванні водою). Адгезія між компонентами одержана шляхом металізації алмазів молібденом. Розбіг між величинами прогнозування та експерименту не перебільшує 25%.

Визначено, що зносостійкість КАМ значно підвищується при наявності адгезії між компонентами. Цей ефект неодноразово описано в літературі, а пояснюється він тим, що інтенсивність зростання втомленісних тріщин значно вища, ніж інтенсивність процесів окислення поверхні матриці при нагріві. Визначено також, що зносостійкість композитів з адгезією між компонентами може бути підвищена шляхом пригнічення процесів механохімії, наприклад, при вживанні для просочування матеріалів, більш стійких до окислення ніж міль, але не постулаючих їй за механічними та технологічними властивостями.

Таким чином проведені дослідження дозволили запропонувати метод прогнозування зносостійкості алмазовмісних матеріалів різної структури, оцінки їх ефективності, а також намітити напрямки мінімізації зношування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. В результаті проведення комплексних досліджень явищ пошкодження робочої поверхні алмазних композитів після термомеханічного

контактування в гірською породою встановлена механохімічна природа зношування матриці КАМ. Визначено температурні інтервали в зоні контактної взаємодії, при яких мають місце механічна або механо-хімічна форми абразивного зношування: при температурі приповерхневих шарів матриці менш ніж 200°C преважує зношування матеріала шляхом викришення під дією тріщин втоми, а при нагріві до $380^{\circ}\text{..}400^{\circ}\text{C}$ домінують процеси механохімічного зносу, тобто процеси інтенсивного утворення та руйнування тонкої крихкої оксидної плівки на робочій поверхні.

2. Вперше побудовано експериментальні кінетичні діаграми втомленісного руйнування КАМ. Визначено, що домінуючим фактором структурного впливу на характер втомленісного руйнування алмазних композитів є міцність зв'язку по межі поділу алмаз-матриця. Показано, що при підвищенні об'ємної концентрації алмазів в КАМ від 0 до 37,5% величина порогового коефіцієнту інтенсивності напружень K_* , який відповідає швидкості росту втомленісної тріщини 10^{-2} м/цикл, знижується в 3,1 рази. Показано, що при забезпеченні міцного адгезійного зв'язку по межі поділу за рахунок металізації алмазів молібденом величина K_* в КАМ з об'ємною концентрацією алмазів 25% підвищується в 1,8 раз.

3. В результаті проведених дериватографічних досліджень визначено температури початку окислення та початку інтенсивного утворення оксидної плівки на поверхні композита. Визначено, що швидкість утворення крихкої пористої оксидної плівки на поверхні матриці при температурах інтенсивного окислення ($380^{\circ}\text{..}430^{\circ}\text{C}$) є величиною одного порядку із швидкістю абразивного зношування КАМ.

4. В результаті чисельного моделювання встановлено, що структурним фактором, визначаючим температуру робочої поверхні матриці КАМ при контактній взаємодії з гірською породою, є умови теплопередавання по межі поділу алмаз-матриця. Показано, що при зміні теплопроводності перехідного шару, умовно введеного по межі поділу, від 1 (для моделювання дискретного контакту між компонентами) до $150 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (для моделювання металізованого прошарку молібдена) температура робочої поверхні матриці змінюється від 130° до 420°C при рівних умовах навантаження.

5. Визначено діапазони зміни структурних умов, в межах яких мають місце механічна або механохімічна форми абразивного зношування матриці КАМ. Встановлено, що зношування в КАМ з механічною взаємодією між компонентами визначається механічними процесами, тобто характером утворення та розвитку втомленісних тріщин на поверхні матриці, а зношування КАМ з адгезійним зв'язком алмаза й матриці - процесами механохімії, тобто характером утворення й руйнування

оксидної плівки на поверхні матриці.

6. В результаті проведених досліджень розроблено підхід, який дозволяє прогнозувати швидкість зношування КАМ на основі фізико-механічних властивостей компонентів та проводити науково-обґрунтований вибір вмісту матриці алмазовмісного композита для забезпечення оптимальної швидкості зносу.

Загальні результати опубліковані в слідуючих роботах:

1. Степанов И.Г., Кудakovский В.Н., Бондарь И.В. Особенности устойчивого разрушения композиционных алмазосодержащих материалов, полученных методом пропитки // Сверхтвердые материалы, 1994. №1 - с. 34-39.
2. Степанов И.Г., Кузнецов С.П., Супрун В.И. Физико-химические особенности теплового расширения КАМ, применяемых в буровом инструменте // Физика и физическая химия сверхтвердых материалов: сб. науч. тр./АН Украины. ИСМ им.В.Н.Вакуля.- Киев, 1992. - С. 112-115.
3. Степанов И.Г., Исонкин А.А. Особенности износа КАМ, полученных методом пропитки // Получение, свойства и применение сверхтвердых материалов:Сб.науч.тр./АН Украины. ИСМ им.В.Н.Вакуля.-Киев, 1992. - С. 14-18.
4. Степанов И.Г. Влияние структуры и свойств на распределение рабочих температур в композиционных алмазосодержащих материалах при бурении // Совершенствование техники и технологии бурения скважин: Сб. науч. тр. / АН Украины. ИСМ им. В.Н.Вакуля. - Киев, 1993. - С. 94-100.
5. Степанов И.Г., Анисин А.М. Исследование теплового режима работы КАМ в процессе бурения // Деп. в ГНТБ Украины. - 1993, №605. - 11 с.
6. Богданов Р.К., Майстренко А.Л., Степанов И.Г. Анализ механизмов износа сверхтвердых композитов, полученных методом пропитки // Качество и надежность узлов трения / Теор. докл. - Хмельницкий, 1992. - С. 32-33.
7. Kulakovsky V.N., Stepanov I.G., Lisovsky A.F., Grachova T.E. Application of the Fracture Mechanics Characteristics to Evaluate Performance of Cutting - Tool Material // Fracture Mechanics: Successes and Problems / Collection of Abstracts. Part 2. - Lviv, 1993. - P.437.
8. Майстренко А.Л., Анисин А.М., Кораблев С.Ф., Степанов И.Г. Влияние структурного состояния композиционных алмазосодержащих материалов на интенсивность их термомеханического износа // Трение. Изнашивание. Усталость / Теор. докл. на Межд. Симп. по Трибофатике. - Гомель, 1993. - С. 56-57.

9. Майстренко А.Л., Богданов Р.К., Кулаковский В.Н., Степанов И.Г. Прогнозирование износостойкости композиционных алмазосодержащих материалов, применяемых в буровом инструменте // Трение. Изнашивание. Усталость / Теор. докл. на Межд. Симп. по Трибофатике. - Гомель, 1993. - С. 56-57.

Степанов И.Г. Разработка метода прогнозирования кинетики износа композиционных алмазосодержащих материалов, полученных методом пропитки. Автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.01- "Материаловедение в машиностроении (промышленность)". Институт сверхтвердых материалов НАН Украины, г. Киев. 1994г.

Защищаются результаты исследования закономерностей износа и метод прогнозирования скорости износа композиционных алмазосодержащих материалов.

Установлены интервалы температур в зоне контактного взаимодействия с горной породой, при которых доминируют механическая или механохимическая формы изнашивания материала: при температуре поверхностных слоев матрицы менее 200°С износ происходит путем усталостного выкрашивания, а при нагреве до 380-400°С доминируют процессы образования и разрушения оксидной пленки на рабочей поверхности. Предложен метод прогнозирования скорости износа материала на основании характеристик циклической трещиностойкости и скорости образования оксидной пленки на его поверхности при нагреве.

Stepanov I.G. The development of the method of wear kinetics prediction of diamond-containing materials, produced by impregnation. Abstract of the thesis of cand.so.eng. in the speciality "Material science in machine building". Institute for the Superhard Materials NAS of Ukraine, Kiev. 1994.

The results of investigation of the wear mechanism and the method of wear kinetics prediction of diamond-containing materials are defended.

The temperature ranges of mechanical and mechanochemical wear in the area of a contact interaction with rock are determined. The wear occurs by fatigue fracture at the temperature of a surface layer below 200° C. The processes of creating and fracturing of oxide film on the working surface are dominant at the temperature of 380-400° C. The method of prediction of wears rate based on characteristics of cyclic crack resistance and growth velocity of oxide film on materials surface is proposed.

Ключові слова: композиційні алмазовмісні матеріали, просочування, тріщина втоми, циклічна тріщиностійкість, окислення, знос.

Ав 30.930

Підписано до друку 22.06.94 р. Формат 60x90/16. Папір друкарський
Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 2,0. Умовн. фарб.-відтиск 2,0.
Облік.-видавнич. арк. 1,8. Тираж 100. Заказ 55. 598

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України
254074 Київ-74, вул. Автозаводська, 2

Репозитив ІНМ НАН України