

# Інструмент, порошки, пасты

---

УДК 622.24.05

**М. В. Супрун\***, **В. І. Куц\*\***, **А. П. Загора,**  
**Р. К. Богданов** (м. Київ)

\*erchiki@ukr.net

\*\*vkushch@bigmir.net

## **Оцінка зносостійкості бурової коронки з армуючими вставками гібридайт**

*Проведено оцінку зносостійкості бурової коронки з армуючими породоруйнівними вставками, досліджено вплив їх розташування на робочий поверхні коронки. Отримано рівняння для визначення ефективного коефіцієнта зношування робочої поверхні коронки в залежності від способу його армування породоруйнівними вставками. Розроблено математичну модель формозміни профілю бурової коронки, яку можна використати для оптимізації конструкції комбінованої матриці, включаючи вибір профілю, оснащеність і застосування породоруйнівних вставок з різною зносостійкістю.*

**Ключові слова:** зносостійкість, бурова коронка, гібридайт, комбінована матриця, коефіцієнт зношування, контактний тиск.

На даний час великий обсяг бурових робіт при розвідці корисних копалин здійснюється у твердих породах.

Для підвищення ефективності буріння геологорозвідувальних свердловин в твердих абразивних породах необхідні нові інструменти з комбінованим (стирання і різання) характером руйнування порід на базі більш твердих і зносостійких елементів з алмазного композиційного матеріалу.

Бурові інструменти, які могли б працювати з високою механічною швидкістю буріння і мати підвищену зносостійкість в твердих породах, а особливо в породах, що перемежуються по твердості, на теперішній час відсутні. Вирішенням даної проблеми може бути застосування комбінованих матриць в алмазних бурових коронках. Тобто використання в імпрегнованій матриці бурової коронки крім стандартних складових (твердого сплаву, природних або синтетичних монокристалічних чи полікристалічних алмазів) для підвищення зносостійкості найбільш вразливих її ділянок додаткових породоруйнівних елементів з надтвердих матеріалів.

Найбільш наукомісткими і багатобічними для практичного застосування є гібридні алмазні композиційні полікристалічні матеріали. Одним з

них є матеріал, розроблений фахівцями Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України – гібридайт [1]. Цей матеріал, що поєднує позитивні властивості синтетичного, природного та CVD-алмазу, має високі фізико-механічні властивості [2–4] і це дозволяє успішно використовувати його в місцях підвищеного зносу профілю матриці бурової коронки.

Проте для ефективного застосування вставок з гібридайт в комбінованій матриці алмазної бурової коронки потрібно провести оцінку впливу даних породоруйнівних елементів на зносостійкість робочого профілю коронки.

### Геометрія бурової коронки, вхідні та вихідні параметри її моделі

Об'єктом комп'ютерного моделювання була бурова коронка (рис. 1, а). Її геометрія є достатньо складною для теоретичного аналізу. Але через циклічність симетрії конструкції коронки по кутовій координаті та обертальний характер її роботи залежність як розподілу тисків, так і зношування від кутової координати не буде значною. Це дозволяє у якості геометричної моделі реальної коронки використати її осесиметричний аналог (див. рис. 1, б), розміри якого вибрано так, щоб забезпечити “еквівалентність” моделі реальному об'єкту. Усереднена по кутовій координаті осесиметрична модель реально є двовимірною, що дає можливість обмежитись аналізом лише її радіального перетину площиною  $Oxz$ .

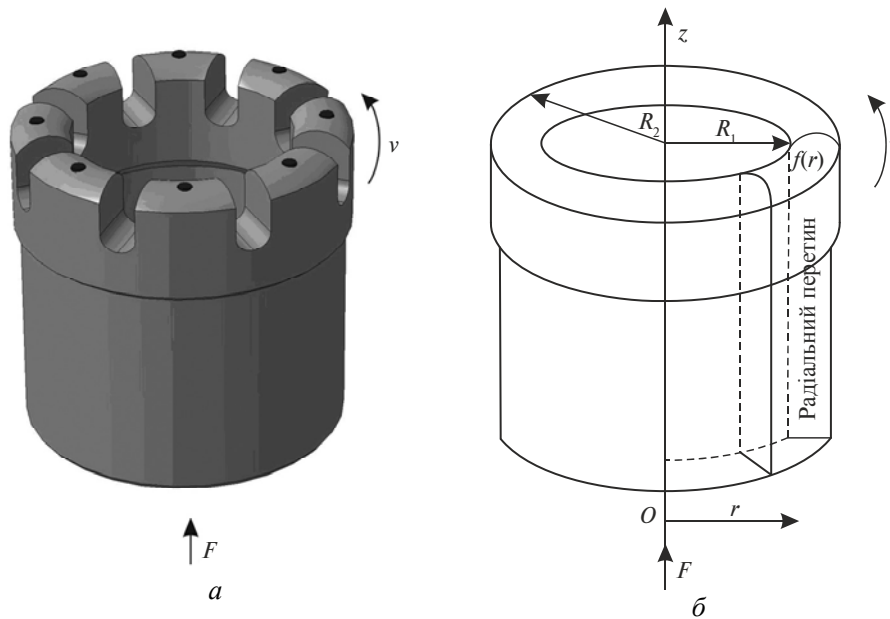


Рис. 1. Бурова коронка (а) і її осесиметрична (усереднена по кутовій координаті) геометрична модель (б).

Вхідними параметрами моделі, які відомі до початку аналізу і в ньому використовуються, є:

– початкова геометрія коронки, а саме внутрішній  $R_1$  та зовнішній  $R_2$  радіуси (див. рис. 1, б), а також форма профілю (твірної) робочого шару коронки в початковий момент часу  $t = 0$ :

$$f(r, 0) \text{ для } R_1 \leq r \leq R_2;$$

– сумарна осьова сила  $F$ , що прикладена до коронки, та коефіцієнт тертя/різання  $k$ , який характеризує взаємодію коронки з породою і породжує окружну силу (опір обертанню), яка власне і виконує роботу руйнування;

– кутова швидкість обертання коронки  $\omega$ , за якою обчислюється лінійна швидкість переміщення матеріальних точок робочої поверхні коронки  $v = 2\pi r\omega$ .

Відомий також диференціальний закон зношування робочої поверхні під дією нормального тиску  $\sigma_n$ :  $\dot{w} = K\sigma_n v$ , де  $K$  – коефіцієнт зношування ( $K_1$  для композиційного алмазовмісного матеріалу (КАМ) и  $K_2$  для вставки гібридайт).

Вихідними параметрами моделі є ефективний коефіцієнт зношування  $K = K_{\text{еф}}(r)$  робочої поверхні коронки в залежності від способу її армування породоруйнівними вставками з гібридайту або з алмазного композиційного термостійкого матеріалу (АКТМ), а також форма профілю робочої поверхні коронки у будь-який момент часу:  $f(r, t)$ ,  $t > 0$ .

### Ефективний коефіцієнт зношування

Як зазначено вище, одним із параметрів моделі є ефективний коефіцієнт зношування  $K = K_{\text{еф}}(r)$  робочого шару коронки, який залежить від способу його армування породоруйнівними вставками з АКТМ чи гібридайту. Для прогнозування форми профілю армованої робочої поверхні коронки  $f(r, t)$ ,  $t > 0$  в рамках розвинутого підходу треба визначитись щодо “еквівалентного” матеріалу з  $K = K_{\text{еф}}(r)$  для моделі, зображеної на рис. 1, б, який би мав таку ж швидкість зношування і результуючий профіль в будь-який момент часу  $t$ , що і реальна коронка (див. рис. 1, а). По-суті, процедура вибору еквівалентного матеріалу є аналогічною визначенню “ефективних” властивостей в механіці структурно-неоднорідних середовищ, що дозволяє скористатися розвинутими там підходами.

Схематично процедуру “гомогенізації” показано на рис. 2.

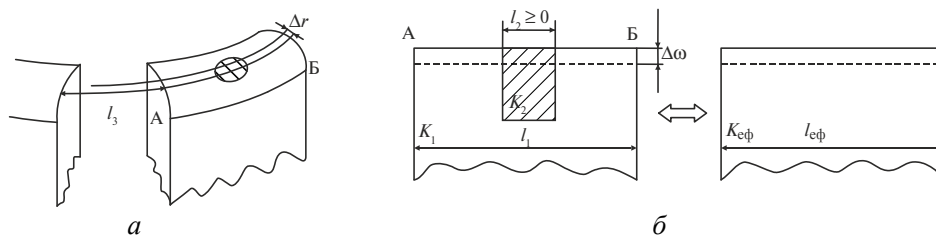


Рис. 2. Схема для визначення ефективного коефіцієнта зношування: загальний вигляд (а) і поперечний розріз (б) сектора бурової коронки.

Припускали, що деякі з робочих елементів (секторів) бурової коронки з коефіцієнтом зношування  $K_1$  оснащені циліндричними породоруйнівними вставками з коефіцієнтом зношування  $K_2$ , причому  $K_2 < K_1$ . Геометрія робочої поверхні коронки визначається поточними параметрами:

- довжиною сектора коронки  $l_1 = l_1(r)$ ;
- довжиною хорди вставки  $l_2 = l_2(r) \geq 0$ ;
- довжиною промивного каналу коронки  $l_3 = l_3(r)$ .

Виділимо інтервал  $[r, r + \Delta r]$  на секторі коронки (див. рис. 2, а), її вигляд збоку подано на рис. 2, б. В усталеному режимі зношування профіль АБ має

відтворюватись, тому швидкості зношування основного матеріалу сектора матриці коронки (КАМ) і породоруйнівної вставки однакові:

$$\dot{w}_1 = K_1 \sigma_{n1} v = \dot{w}_2 = K_2 \sigma_{n2} v = K_{\text{еф}} \sigma_{\text{неф}} v. \quad (1)$$

Оскільки лінійна швидкість постійна, то звідси, по-перше, маємо тиск на вставці  $\sigma_{n2} = \frac{K_1}{K_2} \sigma_{n1}$ , тобто для  $K_2 < K_1$  будемо мати  $\sigma_{n2} > \sigma_{n1}$ .

З іншого боку, сумарна сила  $F = [\sigma_{n2} l_2 + \sigma_{n1} (l_1 - l_2)] \Delta r$ , що діє на виділену смужку, має бути такою ж, як і для модельної коронки, а саме:

$$F = \sigma_{\text{неф}} l_{\text{еф}} \Delta r \quad (l_{\text{еф}} = l_1 + l_3 = \frac{2\pi r}{N}, \quad N - \text{число секторів}). \quad \text{Звідси}$$

$$\sigma_{n2} l_2 + \sigma_{n1} (l_1 - l_2) = \sigma_{n1} \left[ \frac{K_1}{K_2} l_2 + (l_1 - l_2) \right] = \sigma_{\text{неф}} l_{\text{еф}}. \quad (2)$$

Враховуючи вказану вище рівність  $K_1 \sigma_{n1} = K_{\text{еф}} \sigma_{\text{неф}}$ , одержуємо вираз для нормованого ефективного коефіцієнта зношування:

$$\frac{K_{\text{еф}}}{K_1} = \frac{\sigma_{n1} l_{\text{еф}}}{\sigma_{n1} \left[ \frac{K_1}{K_2} l_2 + (l_1 - l_2) \right]} = \frac{K_2 l_{\text{еф}}}{\left[ K_1 l_2 + K_2 (l_1 - l_2) \right]}. \quad (3)$$

У випадку  $l_2 = 0$  отримуємо  $\frac{K_{\text{еф}}}{K_1} = 1 + \frac{l_3}{l_1}$ , другий доданок виникає за раху-

нок того, що перерозподіляється тиск на всю поверхню матриці коронки з промивними каналами включно. Тому для модельної коронки тиск в  $1 + l_3 / l_1$  рази менший, ніж для реального інструменту. Зазначимо, що оскільки  $l_i = l_i(r)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), то ефективний коефіцієнт зношування є функцією радіальної координати:  $K_{\text{еф}} = K_{\text{еф}}(r)$ .

Формула (3) має місце і у випадку, коли замість одного сектора розглядається вся матриця коронки (рис. 3), з тією лише різницею, що тепер  $l_{\text{еф}}(r) = 2\pi r$ , сумарна довжина секторів і каналів матриці коронки дорівнює  $l_1(r)$  і  $l_3(r)$  відповідно, а  $l_2(r)$  – сумарна довжина хорди, яка перетинає породоруйнівні вставки, її можна розглядати як характеристику оснащення матриці коронки породоруйнівними вставками.

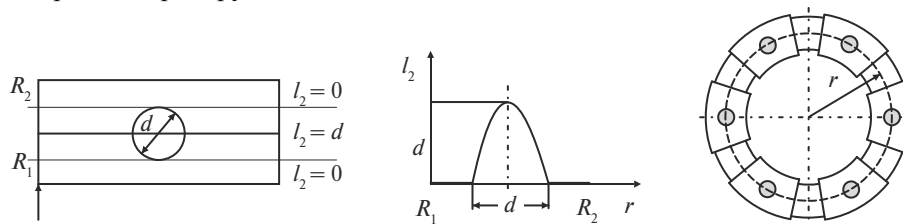


Рис. 3. Схема оцінки оснащення матриці коронки породоруйнівними вставками.

### Розрахунок $K_{\text{еф}}$ для різних варіантів розташування вставок на робочій поверхні бурової коронки

Для обчислення  $K_{\text{еф}}$  для різної геометрії робочої поверхні коронки розроблено програму розрахунку зносостійкості зміцненої породоруйнівними вставками матриці бурової коронки. Вхідними параметрами програми є геометричні розміри матриці коронки та вставок, їх кількість, спосіб розташування і

коефіцієнт зношування. Результатом розрахунку є значення  $K_{\text{еф}}/K_1$ , тиску та форма профілю.

Наведемо розрахунок  $K_{\text{еф}}$  для двох варіантів розташування вставок з різною зносостійкістю на робочій поверхні бурової коронки діаметром 76 мм, із зовнішнім радіусом  $R_2 = 38$  мм і внутрішнім радіусом  $R_1 = 29$  мм, довжина промивного каналу коронки дорівнює 40 % довжини сектора, радіус вставки  $R_B = 1,5$  мм, кількість вставок – 6 шт., осьове навантаження на коронку  $F_z = 10$  кН.

У першому варіанті розташування (I) три вставки було розміщено біля внутрішньої торцевої поверхні матриці коронки, з центрами на колі радіусом  $r = R_1 + R_B = 30,5$  мм, а інші три – біля зовнішньої торцевої поверхні на колі радіусом  $r = R_2 - R_B = 36,5$  мм. За відсутності породоруйнівних вставок (або

коли  $K_2 = K_1$ )  $\frac{K_{\text{еф}}}{K_1} = 1 + \frac{l_3}{l_1} = 1,4$  (рис. 4, лінія 1).

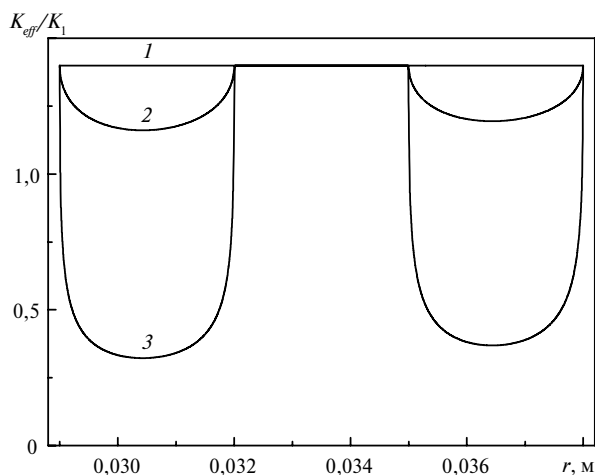


Рис. 4. Залежність ефективного коефіцієнта зношування від радіальної координати, розташування I: 1 – КАМ; 2 – АКТМ; 3 – гібридайт.

Наявність породоруйнівних вставок на периферійній частині робочої поверхні матриці бурової коронки суттєво знижує  $K_{\text{еф}}$ , а отже підвищує зносостійкість цих частин її профілю. В той же час, центральна частина профілю є незахищеною і там слід очікувати підвищеної інтенсивності зношування.

За формулою (1) розраховано контактний тиск, який би забезпечив рівномірне зношування матриці бурової коронки з таким розташуванням породоруйнівних вставок, а саме:

$$\sigma_{n \text{ еф}} = \frac{C}{2\pi\omega r K_{\text{еф}}(r)}, \quad (4)$$

де  $C$  – нормуюча константа. Як видно на рис. 5, наявність армування робить розподіл контактного тиску досить неоднорідним, з концентрацією напружень на периферійних ділянках робочої поверхні. У даному разі ефективний коефіцієнт зношування також є неоднорідним, тому цей випадок є цікавим з точки зору можливості перевірки працездатності викладеного вище алгоритму розрахунку еволюції форми профілю матриці коронки.

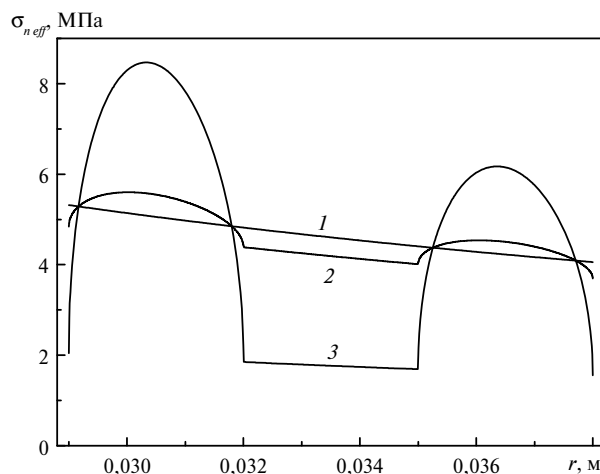


Рис. 5. Розподіл контактного тиску, розташування I: 1 – КАМ; 2 – АКТМ; 3 – гібридайт.

Більш простий (втім, наближений) спосіб оцінки форми профілю матриці коронки може бути одержано з використанням теоретичних результатів, наведених в [5, 6]. Користуючись встановленою у вказаних роботах аналогією між контактними і зносоконтактними задачами, можна записати вираз для усталеної форми зношування кільцевого штампу у випадку неоднорідного по радіусу коефіцієнта зношування (див. рис. 4) з точністю до масштабуючої константи:

$$\frac{f_{\infty}(r) - f_{\infty}(R_1)}{\tilde{C}} = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{[K_{\text{эф}}(r)]^{-1} dr' d\varphi}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \varphi}}. \quad (5)$$

Чисельне інтегрування в (5) не викликає ускладнень.

На рис. 6 наведено розраховану по формулі (5) еволюцію профілю матриць коронок при розташуванні I породоруйнівних вставок.

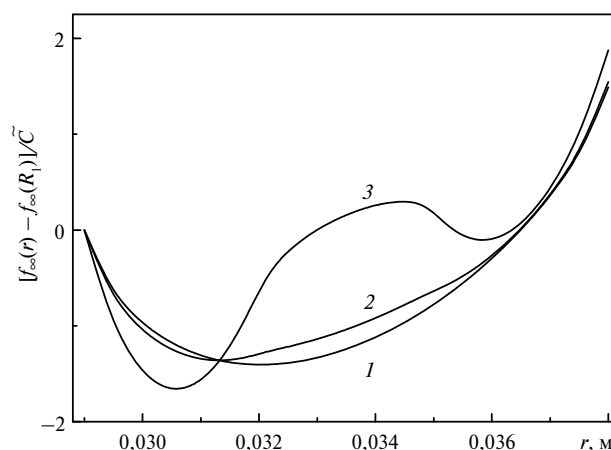


Рис. 6. Еволюція профілю матриць коронок (розташування I): 1 – КАМ; 2 – АКТМ; 3 – гібридайт.

Дані для КАМ (див. рис. 6, крива 1) співпадають з існуючими експериментальними результатами [7]. Для АКТМ (див. рис. 6, крива 2) збільшується зношування у центральній частині. Щодо вставок з гібридайту, то еволюція

профілю матриці коронки (див. рис. 6, крива 3) якісно узгоджується з наведеною на рис. 5 формою профілю, одержаною чисельним моделюванням.

Інший розглянутий варіант розташування (II) відповідає рівномірному розміщенню породоруйнівних вставок уздовж радіального профілю матриці коронки на відстані від центру: 30,5, 31,7, 32,9, 34,1, 35,3 і 36,5 мм. Як показують розрахунки, при застосуванні АКТМ  $K_{\text{еф}}$  (а отже і швидкість зношування) зменшується на 10–15 %, а у випадку гібридайт – практично втричі (рис. 7).

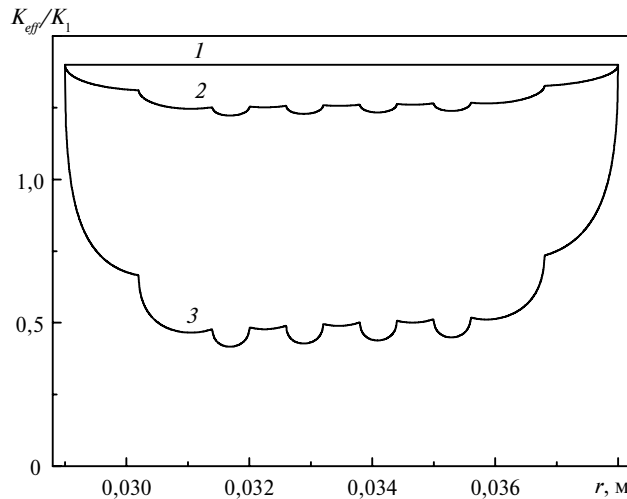


Рис. 7. Залежність ефективного коефіцієнта зношування від радіальної координати, розташування II: 1 – КАМ; 2 – АКТМ; 3 – гібридайт.

На рис. 8 наведено розраховану по формулі (5) еволюцію профілю матриць коронок при розташуванні II породоруйнівних вставок.

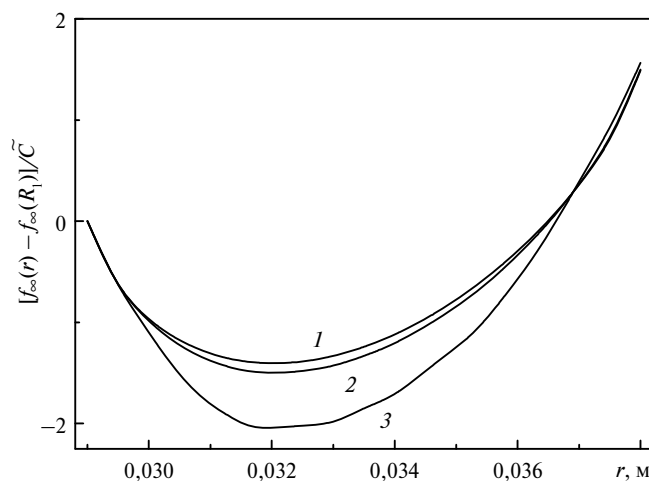


Рис. 8. Еволюція профілю матриць коронок (розташування II): 1 – КАМ; 2 – АКТМ; 3 – гібридайт.

Тут ситуація протилежна попередній – більш “захищеною” породоруйнівними вставками є центральна частина робочої зони, тому і ступінь її зносу

очікувано менший у порівнянні з периферійними ділянками матриці бурової коронки.

Усі наведені вище розрахунки підтверджуються експериментальними дослідженнями [8]. Це доводить адекватність моделі і можливість її застосування при прогнозуванні оцінки зносостійкості алмазних бурових коронок з армуючими вставками гібридайт.

Аналогічні розрахунки можна виконати для довільного варіанту розташування породоруйнівних вставок. Втім, остаточний вибір на користь того чи іншого варіанту має враховувати, крім зносостійкості, інші важливі для практики чинники, і в першу чергу – ефективність роботи бурової коронки.

## ВИСНОВКИ

Проведена оцінка зносостійкості бурової коронки з армуючими вставками показала, що використання породоруйнівних вставок з гібридайт при оптимальному варіанті їх розміщення на робочій поверхні приводить до зменшення швидкості зношування коронки в порівнянні зі вставками з інших матеріалів.

Розроблену математичну модель формозміни профілю бурової коронки можна використовувати для оптимізації конструкції комбінованої матриці, включаючи вибір профілю, оснащення і застосування породоруйнівних вставок з різною зносостійкістю для забезпечення рівномірного зносу робочої поверхні матриці бурової коронки, а отже, істотного підвищення надійності та терміну експлуатації.

*In this work we evaluated the durability of the crown reinforcement with rock cutting inserts and studied the effect of the method of their placement. The equation for determining the effective rate of deterioration of the working layer of the crown, depending on how it is reinforcing cutter inserts. A mathematical model of the drill bit forming the profile, which can be used to optimize the design of the combined matrix, including the selection of profile cutters and the use of equipment with different inserts.*

**Keywords:** wear, drill bit, gibridayt, combined matrix, wear factor, the contact pressure.

*Проведена оцінка зносостійкості бурової коронки з армуючими породоразрушаючими вставками і досліджено вплив їх розміщення на робочій поверхні коронки. Отримано рівняння для визначення ефективного коефіцієнта зносу робочого слоя коронки в залежності від способу його армування породоразрушаючими вставками. Розроблена математична модель формозміни профілю бурової коронки, яку можна використовувати для оптимізації конструкції комбінованої матриці, включаючи вибір профілю, оснащення і застосування породоразрушаючих вставок з різною зносостійкістю.*

**Ключевые слова:** зносостойкость, буровая коронка, гибридайт, комбинированная матрица, коэффициент износа, контактное давление.

1. Шульженко А. А., Ашкинази Е. Е., Соколов А. Н. и др. Новый ультратвердый поликристаллический композиционный материал // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2009. – Вып. 12. – С. 143–153.
2. Шульженко А. А., Ашкинази Е. Е., Богданов Р. К. и др. Исследования работоспособности нового гибридного алмазного композиционного поликристаллического материала при разрушении крепких горных пород // Наук. праці Донец. нац. техн. ун-ту. Серія “Гірнично-геологічна”. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 13(178). – С. 117–121.
3. Супрун М. В., Загора А. П., Богданов Р. К. и др. Оценка эффективности разрушения твердых горных пород буровыми коронками, оснащёнными синтетическими алмазами и вставками гибридайт // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техни-



- ка и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2013. – Вып. 16. – С. 39–43.
4. Супрун М. В., Загора А. П., Богданов Р. К. и др. Оценка характера разрушения горных пород различными породоразрушающими элементами // Наук. праці Донец. нац. техн. ун-ту. Серія “Гірничо-геологічна”. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 2(19). – С. 253–256.
  5. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
  6. Горячева И. Г., Торская Е. В. Контактные задачи при наличии износа для тел с переменным по поверхности коэффициентом износостойкости // Трение и износ. – 1992. – **13**, № 1. – С. 185–194.
  7. Онищук В. П. О характере износа импрегнированных коронок при бурении диабазов // Методика и техника разведки. – 1965. – № 54. – С. 38–41.
  8. Супрун М. В., Богданов Р. К., Загора А. П. Влияние схемы расстановки вставок гибрида в импрегнированных коронках на эффективность бурения твердых горных пород // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2014. – Вып. 17. – С. 26–32.

Ин-т надтвердих матеріалів  
ім. В. М. Бакуля НАН України

Надійшла 08.07.15