

**В.В. Кустов, к.т.н., доц.
П.М. Присяжнюк, к.т.н., доц.
О.М. Богаченко, інж.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Дослідження зносостійкості наплавлених зубків шарошкових доліт методом планування експерименту

Досліджено шляхи підвищення зносостійкості зубків шарошкових доліт. Запропоновано способи армування робочих поверхонь зубків плакованими нікелем гранулами реліту або сумішшю порошків титану та карбіду бору. Розроблено математичні моделі процесу зносу армованих поверхонь, наплавлених плакованим і неплакованим релітом. Встановлено підвищення зносостійкості зубків, покритих плакованим релітом в 1,21 раза порівняно із стандартними. Показано перспективність застосування електродугового наплавлення суміші порошків титану і карбіду бору з використанням самопоширюючогося високотемпературного синтезу для зміцнення елементів озброєння шарошкових бурових доліт, яке забезпечує зносостійкість на рівні покриттів наплавлених із застосуванням карбіду вольфраму.

Ключові слова: шарошкове бурове долото; зубок; наплавлене покриття; реліт; зносостійкість; математична модель

Постановка проблеми. В сучасній нафтогазовидобувній галузі найбільш поширеним методом буріння свердловин є метод обертового буріння із застосуванням шарошкових доліт, а також доліт типу PDC [1]. При цьому озброєння бурових доліт – зубки, контактуючи з гірською породою піддаються інтенсивному зношуванню під дією таких факторів: високі навантаження на забої, значні температурні градієнти, наявність агресивних середовищ із абразивними частинками, зміна товщини пластів та твердості гірських порід. Під дією цих чинників робоча поверхня зубків притуплюється та руйнується, що призводить до зниження питомого тиску на вибої, зменшення швидкості проходки, а це, в свою чергу, вимагає виконання спуско-підймальних робіт колони бурильних труб для заміни долота. Для зниження впливу вказаних явищ на ефективність процесу буріння ідуть шляхом вдосконалення конструкції зубків, створення нових матеріалів для зубків, вдосконалення способів їх виготовлення і зміцнення, оптимізації технологічних параметрів бурових робіт. Оскільки дана робота належить до галузі машинобудування, то нас будуть цікавити природньо перші два напрямки. Розглянемо їх у вказаному вище порядку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За конструкцією зубки шарошкових доліт бувають монолітні, які виготовляють за одне ціле з шарошкою шляхом фрезерування на корпусі цієї шарошки, з наступним поверхневим армуванням (наплавленням) робочої частини зубків твердим матеріалом [2]. Одним із недоліків зубків такої конструкції є постійна необхідність вирішення задачі вибору оптимальних форми і розмірів армованої зони на їх робочих поверхнях. Іншим варіантом конструкції зубків шарошок є вставні твердосплавні зубки [2]. Для них характерне нераціональне використання дорогих матеріалів, оскільки їх кріпильна і робоча частини цілком виготовлені із твердого сплаву, а також недостатня надійність кріплення (запресуванням) в корпусі шарошки. Як матеріал зубків застосовують в основному литий карбід вольфраму (реліт) і тверді сплави: вольфрамокобальтові (ВК) або титановольфрамокобальтові (ТК) [3].

Конструкція і матеріал зубків визначають як спосіб їх виготовлення, так і зміцнення. Так, вставні твердосплавні зубки, отримують методами порошкової металургії. Вони мають низький ресурс роботи при високих динамічних навантаженнях, оскільки тверді сплави, з яких вони виготовлені, є недостатньо ефективними при роботі з ударними навантаженнями.

Вказані вище недоліки вставних твердосплавних зубків, виготовлених з одного матеріалу, в деякій мірі вирішують шляхом застосування композиційних зубків, отриманих на сталевій зв'язці методом відцентрового армування, із застосуванням зерен реліту або твердих сплавів для армування робочої частини [4, 5, 6]. Однак при цьому знижуються різальні властивості шарошок, озброєних такими зубками, при бурінні твердих гірських порід.

Слід відзначити і складність процесу збирання вставних зубків із корпусом шарошок. Більш дешевою є технологія виготовлення шарошок із фрезерованими зубками із подальшим наплавленням релітом робочих поверхонь за різноманітними схемами, оскільки вона не включає складний процес запресування, що має місце при застосуванні вставних твердосплавних зубків.

Слід також відмітити спільний суттєвий недолік розглянутих вище технологій формування армованих поверхонь як вставних, так і фрезерованих зубків, який полягає в тому, що карбід вольфраму,

який є основною складовою розглянутих породоруйнівних матеріалів (реліт, тверді сплави типу ВК і ТК), інтенсивно розчиняється у рідкому металі сталевій матриці з дифузією в сталь вуглецю під час відцентрового литва або наплавлення. При цьому знижуються зносостійкі властивості вказаних матеріалів і погіршуються фізико-механічні властивості перехідної зони.

Метою роботи є підвищення зносостійкості зубків шарошкових доліт шляхом наплавлення плакованих нікелем гранул реліту та проведення порівняльних випробувань на зношування із зубками, які наплавлені релітом за стандартною технологією та наплавленими із використанням самопоширюючого високотемпературного синтезу.

Вибір об'єкта дослідження – фрезерованих зубків шарошок, обумовлений меншою трудомісткістю виготовлення їх дослідних зразків зі сталі 20ХНЗМА, а також більш прогнозованим і керованим процесом поверхневого армування.

Викладення основного матеріалу. Для зменшення розчинення гранул твердого сплаву в розтопленій сталі та підвищення міцності закріплення їх в матриці запропоновано здійснювати плакування цих гранул нікелем. На основі патенту № 671655 [6] розроблено технологічний процес та обладнання для віброелектроіскрового легування (ВЕІЛ) поверхні гранул реліту нікелем. Технологічний процес містить операції, що наведені в таблиці 1.

Формування нікелевого шару на зернах реліту здійснювали таким чином. Циліндричний електрод, виготовлений з нікелю, занурювали в середовище гранул реліту на установці, описаній в патенті [7]. Зерна реліту розміщували в контейнері, який здійснював коливальний рух. Циліндричний електрод та контейнер футерували накладками з нікелю. Порожнину контейнера, в якому розташований циліндричний електрод, заповнювали гранулами реліту. За допомогою струмопідводів подавали напругу електричного струму на контейнер та електрод від джерела живлення. При проходженні струму через електричний ланцюг: “нікелевий електрод-анод, гранули реліту, нікелевий контейнер-катод”, між гранулами реліту та поверхнею нікелевого електрода виникають електроіскрові заряди, котрі забезпечують спрямоване перенесення нікелю на поверхню гранул реліту, формуючи таким чином покриття.

Таблиця 1

Технологічний маршрут процесу ВЕІЛ нікелем гранул реліту

№ з/п	Назва і зміст операції	Обладнання
1	Термічна Просушити порошок реліту при температурі 200–250 °С протягом 1,5–2 годин	Піч муфельна
2	Віброелектроіскрова Провести віброелектроіскрове легування нікелем гранул реліту (товщина легуваного шару 0,02 – 0,3 мм)	Модернізована установка для ВЕІЛ
3	Контрольна: 3.1. Візуальний контроль якості нікелевого покриття на гранулах реліту 3.2. Металографічний аналіз гранул з покриттям мікрошліфів	Лупа Мікротвердомір ПМТ-3

В роботі нами було проведено також порівняльні дослідження з випробування на знос зубців з наплавленою робочою поверхнею за схемою збільшення площі армування за шириною зубка, яка описана в роботі [8] з використанням як гранул реліту без легування, так і поверхневолегованих нікелем. Леговані нікелем гранули реліту застосовуються також і для армування при відцентровому литві [9].

Для поверхневого армування зубків застосували гранули реліту з умовним діаметром 0,4–1,6 мм. Щоб визначити вплив технологічних параметрів процесу формування наплавленого композиційного покриття на величину зносу зубків шарошкового бурового долота у використовували такі фактори: X_1 – кут загострення зубка (30–60 град); X_2 – умовний діаметр гранул реліту (0,4–1,6 мм); X_3 – температура підігріву основи (580–650 °С); X_4 – радіус заокруглення вершини зубка (0,5–1,5 мм). Для опису процесу зношування наплавлених зубків у залежності від їх конструкції та параметрів технологічного процесу наплавлення застосовували лінійну модель (y , y_i – знос зубків наплавлених нелегованими і легованими нікелем гранулами реліту відповідно, мм)

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (1)$$

Для повнофакторного експерименту при $k = 4$ провели 16 дослідів на верхніх і нижніх рівнях факторів. Кожен дослід при випробуваннях на зношування зразків повторювали три рази. Обробку результатів досліджень, розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінювання їх значущості та адекватності отриманої моделі проводили за відомою методикою [10].

$$y_{\text{л}} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (2)$$

де b_0 – вільний член рівняння;

b_i – коефіцієнти регресії, відповідно;

x_i – кодові значення факторів;

$k = 4$ – кількість факторів.

На основі обробки результатів планування експерименту були побудовані такі математичні моделі:

$$y = 2,79 - 0,52x_1 - 0,15x_2 - 0,29x_3 - 0,22x_4 [8]; \quad (3)$$

$$y_{\text{л}} = 2,23 - 0,42x_1 - 0,19x_2 - 0,15x_3 - 0,27x_4. \quad (4)$$

Графічна ілюстрація результатів отриманих моделей зношування (3) і (4), від двох змінних факторів, прийнявши значення двох інших факторів на нульовому рівні, наведена на рисунку 1.

Наплавлення гранул реліту, покритих віброелектроіскровим легуванням нікелем, на робочу поверхню зубків за оптимальних значень параметрів технологічного процесу, встановлених в даній роботі, дозволили підвищити їх зносостійкість в 1,21 раза у порівнянні із наплавленими зубками релітом без нікелевого покриття за стандартною технологією.

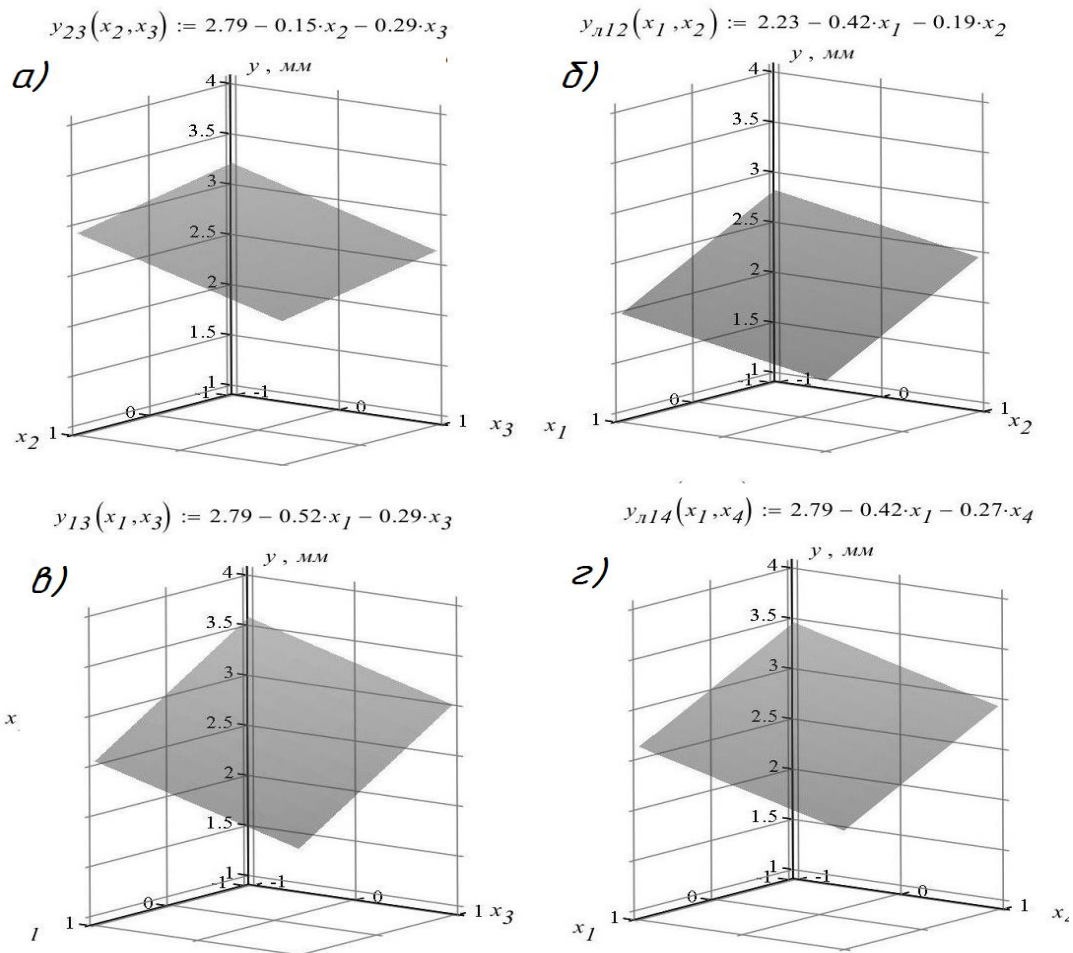


Рис. 1. Поверхні відгуку залежності зносу від конструктивно-технологічних параметрів:
а, в – зубки, наплавлені гранулами реліту без легування;
б, г – зубки, наплавлені гранулами реліту з легування нікелем

Аналіз поверхонь відгуку показав, що мінімальний і максимальний знос зубків, наплавлених гранулами реліту без легування, буде при параметрах x_1 і x_3 (рисунку 1, в) та x_2 і x_3 (рисунку 1, а) відповідно. Для зубків, наплавлених гранулами реліту з легуванням нікелем, мінімальний і максимальний знос зубків буде при параметрах x_1 і x_3 (рисунку 1, в) та x_1 і x_2 (рисунку 1, б) відповідно.

Для порівняння випробовували також зубки, які були наплавлені електродуговим методом з використанням порошкових електродних матеріалів. Шихта цих електродів містила суміш порошоків Ti та V_4C [10]. За рахунок проходження самопоширюючого високотемпературного синтезу в процесі наплавлення зубців формуються зерна TiB_2 , які представляють собою правильні шестикутні призми з шириною грані ~ 50 мкм та висотою ребра ~ 23 мкм. Їх об'ємний вміст у наплавленому покритті становить ~ 34 %, що забезпечує високі показники твердості. Зносостійкість отриманого покриття у 5–7 разів є вищою порівняно із серійними електродними матеріалами на основі залізо-хромистих сплавів, і знаходиться приблизно на рівні наплавлених покриттів на основі карбіду вольфраму без плакування нікелем.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Проаналізовано конструкторські і технологічні шляхи вдосконалення процесів зміцнення зубків шарошкових доліт.

2. Запропоновано спосіб плакування нікелем гранул карбідних матеріалів (реліту) призначених для армування робочих поверхонь зубків для запобігання інтенсивного розчинення цих гранул у сталевій матриці;

3. На основі планування експерименту було побудовано математичні моделі процесу зношування зубків армованих звичайними та плакованими нікелем гранулами реліту;

4. Встановлено, що зносостійкість зубків наплавлених плакованими нікелем гранулами реліту вища в 1,21 рази порівняно із неплакованим, а зміцнені наплавленням зубки із використанням самопоширюючого високотемпературного синтезу мають зносостійкість на рівні зміцнених наплавленням покриття на основі карбіду вольфраму без плакування нікелем.

У подальших дослідженнях планується дослідити зносостійкість зубків, отриманих відцентровим литвом при їх об'ємному армуванні плакованими нікелем гранулами карбіду вольфраму.

Список використаної літератури:

1. Pryhorovska T.O. Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement / T.O. Pryhorovska // *Machining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 21, Iss. 1. – Pp. 37–66. – Access mode : <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1260429>.
2. Яким Р.С. Науково-технічні основи технології виготовлення тришарошкових бурових доліт та підвищення їх якості і ефективності : монографія / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2011. – 384 с.
3. Бугай Ю.Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю.Н. Бугай, И.В. Воробьев. – Львов : Вища школа : Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 208 с.
4. А. с. 1197249 СССР, МКИ³ В 22 D 19/02. Способ получения армированных отливок / Ю.Н. Бугай, В.В. Кустов, А.В. Быков, А.М. Гасалов, Р.Л. Алавердов ; заявитель ИФИНГ. – № 3505285/22-02 ; заявл. 27.10.82.
5. А. с. 1491609 СССР, МКИ³ В 2 D 27/02. Устройство для получения армированных отливок / А.М. Абдулзаде, Р.Т. Карпик, Ю.Н. Бугай, Ю.Д. Петрина, В.В. Кустов ; заявитель ИФИНГ. – № 4344055/31-02 ; заявл. 23.11.87 ; опубл. 07.07.89, Бюл. № 25.
6. Оптимизация комбинированного твердосплавного инструмента для бурения горных пород / И.О. Шуляр, В.В. Врюкало, Л.Я. Роп'як, Д.Ф. Лялюк // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2013. – № 10. – С. 4–6.
7. Пат. 67165 Україна, МПК В 05 D 3/14. Спосіб підготовки поверхні деталей перед газотермічним напиленням покриттів / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як, А.К. Смаглюк ; заявник і патентовласник В.В. Кустов. – № u201107081 ; заявл. 06.06.11 ; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3.
8. Семеген О.М. Дослідження та моделювання впливу конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошкових доліт / О.М. Семеген, З.М. Одосій, В.В. Кустов // *Проблеми міцності*. – 2014. – № 4 (430). – С. 162–171.
9. А. с. 1435385 СССР, МКИ³ В 22 D 13/00, 19/02. Способ получения армированных отливок / К.Б. Кацов, Ю.Н. Бугай, С.И. Кантор, М.А. Пятибратов, О.М. Богаченко ; заявитель Специальное конструкторско-технологическое бюро физико-механического института им. Г.В. Карпенка. – № 4090865/31-02 ; заявл. 22.05.86 ; опубл. 07.11.88, Бюл. № 41.
10. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 280 с.
11. Formation of structure and properties of composite coatings TiB_2 -TiC-Steel obtained by overlapping of electric-arc surfacing and self-propagating higherature synthesis / D.L. Lutsak, P.M. Prsyazhnyuk, M.O. Karpash, V.V. Pylypiv, V.V. Kotsyubynsky // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 38, No. 9 – Pp. 1265–1278.

References:

1. Pryhorovska, T.O. (2017), «Study on rock reaction force depending on PDC cutter placement», *Machining Science and Technology*, Vol. 21, Iss. 1, pp. 37–66, available at: <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2016.1260429>
2. Yakim, R.S., Petrina, Yu.D. and Yakim, I.S. (2011), *Naukovo-tehnichni osnovy tehnologii' vygotovlennja trysharoshkovykh burovykh dolit ta pidvyshhennja i'h yakosti i efektyvnosti*, monografiya, IFNTUNG, Ivano-Frankivsk, 384 p.

3. Bugay, Yu.N. and Vorobev, I.V. (1989), *Tsentrobezhno-armirovannyiy porodorazrushayuschiy burovoy instrument*, Vischa shkola, Izd-vo pri Lvov. un-te, Lvov, 208 p.
4. Bugay, Yu.N., Kustov, V.V., Byikov, A.V., Gasalov, A.M. and Alaverdov, R.L., IFING (1982), MKI3 V 22 D 19/02. *Sposob polucheniya armirovannyih otlivok* [Method for the production of reinforced castings], USSR, a. s. No. 1197249.
5. Abdulzade, A.M., Karpik, R.T., Bugay, Yu.N., Petrina, Yu.D. and Kustov, V.V., IFING (1987), MKI3 V 2 D 27/02. *Ustroystvo dlya polucheniya armirovannyih otlivok* [Device for production of reinforced castings], USSR, a. s. No. 1491609.
6. Shulyar, I.O., Vryukalo, V.V., Ropyak, L.Ya. and Lyalyuk, D.F. (2013), «Optimizatsiya kombinirovannogo tverdospalnogo instrumenta dlya bureniya gorniy porod», *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, No. 10. pp. 4–6.
7. Kustov, V.V., Rop'yak, L.Ya. and Smaglyuk, A.K., patentovlasnik Kustov, V.V. (2011), МПК В 05 D 3/14. *Sposib pidgotovky poverhni detalej pered gazotermichnym napylenjam pokryttiv* [Method of preparation of the surface of the parts before the gas-thermal coating of the coatings], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. No. 67165.
8. Semegen, O.M., Odosiy, Z.M. and Kustov, V.V. (2014), «Doslidzhennya ta modelyuvannya vplivu konstruktivnogo oformlennya i tehnologichnih parametriv vigotovlennya na pokazniki znoshuvannya armovanogo ozbroennya sharoshkovih dolit», *Problemi mitsnosti*, No. 4 (430), pp. 162–171.
9. Katsov, K.B., Bugay, Yu.N., Kantor, S.I., Pyatibratov, M.A. and Bogachenko, O.M., Spetsialnoe konstruktorsko tehnologicheskoe byuro fiziko-mehanicheskogo instituta im. G.V. Karpenka (1986), MKI3 V 22 D 13/00, 19/02. *Sposob polucheniya armirovanyih otlivok* [Method for obtaining reinforced castings], SSSR, Pat. No. 1435385.
10. Adler, Yu.P., Markova, Yu.P. and Granovskiy, Yu.V. (1976), *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyih usloviy*, Nauka, Moskva, 280 p.
11. Lutsak, D.L., Prysyzhnyuk, P.M., Karpash, M.O., Pylypiv, V.V. and Kotsyubynsky, V.V. (2016), «Formation of structure and properties of composite coatings TiB2-TiC-Steel obtained by overlapping of electric-arc surfacing and self-propagating higherature synthesis», *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 38, No. 9, pp. 1265–1278.

Кустов Віктор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерного машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання в технології машинобудування;
- технологія нанесення покриттів.

Присяжнюк Павло Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювання конструкцій і відновлення деталей машин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- композиційні матеріали та покриття;
- математичне моделювання в матеріалознавстві;

E-mail: pavlo1752010@gmail.com.

Богаченко Олег Михайлович – інженер, кафедра комп'ютерного машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

- відцентрове армування;
- дослідження процесів зношування;
- міжнародна сертифікація продукції.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2017.