

ІНФОРМАЦІЙНІ ПРОГРАМИ ТА КОМП'ЮТЕРНО- ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.24.05

DOI: 10.31471/1993-9965-2019-1(46)-72-79

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ВІДЦЕНТРОВОГО АРМУВАННЯ НА ЗНОШУВАННЯ ЗУБКІВ ШАРОШОК БУРОВИХ ДОЛІТ

В. В. Кустов, І. О. Шуляр, В. М. Грабовецький

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: ira.shuliar@gmail.com*

Проведено дослідження з метою підвищення роботоздатності бурових доліт. Зазначено, що основним робочим елементом долота є шарошки з зубчастим оснащенням, виконаним у вигляді суцільних або вставних зубків. Оснащення шарошок у процесі руйнування гірських порід піддається інтенсивному зношуванню під дією високих навантажень на вибої, значних перепадів температур, в умовах присутності абразивних частинок, зміни твердості порід. Для зменшення впливу зазначених факторів на знос породоруйнівного оснащення пропонуються комплексні конструкторсько-технологічні заходи зі створення породоруйнівного інструменту і, зокрема, його оснащення. Критерієм ефективності проведення таких заходів пропонується обрати стійкість породоруйнівних елементів до різних видів зношування. Для реалізації запропонованого підходу в створенні ефективного оснащення проведено критичний аналіз конструкції шарошок бурових доліт, оснащених зубками різних конструкцій, і технологій їх виготовлення. Об'єкт досліджень обрано шарошки із вставними зубками, виготовленими методом відцентрового армування як найбільш оптимальним. Конструкція таких зубків, яка реалізується процесом відцентрового литва, передбачає розташування породоруйнівного твердого сплаву в головці зубка. Ніжка зубка, що запресовується в корпус шарошки, виконана зі сталі. Побудовано математичну модель процесу відцентрового армування зубків шарошок бурових доліт для дослідження впливу режимів процесу на їх стійкість до ударно-абразивного зносу. Як незалежні змінні (інакше фактори), які визначають режими технологічного процесу відцентрового армування, було обрано X_1, X_2, X_3, X_4 ; встановлено їх основний рівень та інтервали зміни, верхній та нижній рівні. В роботі використовувався повний факторний експеримент 2^4 . Було складено план експерименту. У відповідності із обраним планом було виконано 16 активних експериментів, причому кожний дослід повторювався тричі. Далі проведено побудову математичної моделі і рівняння регресії, що її описує. Встановлено ступінь впливу факторів процесу на величину ударно-абразивного зносу зубків та оптимальні їх значення.

Ключові слова: відцентрове армування, стійкість, знос, зубок, математична модель, фактори.

Проведено исследование с целью повышения работоспособности буровых долот. Отмечено, что основным рабочим элементом долота являются шарошки с зубчатым оснащением, выполненным в виде сплошных или вставных зубков. Оснащение шарошек при разрушении горных пород подвергается интенсивному износу под воздействием высоких нагрузок на забое, значительных перепадов температур, в условиях

присутствия абразивных частиц, изменения твердости пород. С целью уменьшения влияния указанных факторов на износ породоразрушающего оснащения предлагаются комплексные конструкторско-технологические мероприятия по созданию породоразрушающего инструмента и, в частности, его оснащения. Критерием эффективности проведения таких мероприятий предлагается выбрать устойчивость породоразрушающих элементов к различным видам износа. Для реализации предложенного подхода в создании эффективного оснащения проведен критический анализ конструкции шарошек буровых долот с зубками различных конструкций и технологий их изготовления. Объект исследований – шарошки со вставными зубками, изготовленными методом центробежного армирования как наиболее оптимальный. Конструкция зубков, реализующаяся процессом центробежного литья, предусматривает расположение породоразрушающего твердого сплава в головке зубка. Ножка зубка, которая запрессовывается в корпус шарошки, выполнена из стали. Построена математическая модель процесса центробежного армирования зубков шарошек буровых долот для исследования влияния режимов процесса на их устойчивость к ударно-абразивному износу. В качестве независимых переменных (факторов, определяющих режимы технологического процесса центробежного армирования) были выбраны X_1, X_2, X_3, X_4 , установлен их основной уровень и интервалы варьирования, верхний и нижний уровни. В работе использовался полный факторный эксперимент 2^4 . Был составлен план эксперимента. В соответствии с выбранным планом выполнено 16 активных экспериментов, причем каждый опыт повторялся трижды. Далее проведено построение математической модели и уравнения регрессии, которая ее описывает. Установлена степень влияния факторов процесса на величину ударно-абразивного износа зубков и оптимальные их значения.

Ключевые слова: центробежное армирование, стойкость, износ, зубок, математическая модель, факторы.

A study was performed to improve the performance of drill bits. It is noted the main work item are cones, equipped with serrated arms, made in the form of solid or false teeth. It is noted reinforcement of cutters during destruction of rocks is subjected to intensive wear under the action of high loads at the bottom, significant temperature differences, in the presence of abrasive particles, changes in the rock hardness. To reduce the impact of these factors on the wear of rock-destruction weapons, comprehensive design and technological measures are proposed to create a rock-destructive tool and, in particular, its reinforcement. The efficiency criterion of such events is proposed to choose resistance of rock-cutting elements to various types of wear. For implementation of the proposed approach to creating effective reinforcement, a critical analysis of the design of the cutter teeth of drill bits equipped with teeth of various designs and technologies for their manufacture was performed, and rolling cutters with plug-in teeth made by centrifugal reinforcement were selected as the object of research as the most optimal. The design of such teeth, implemented by a centrifugal casting process, provides for location of the rock-breaking hard alloy in the tooth head. The tooth root, pressed into the cutter housing, is made of steel. A mathematical model of the process of centrifugal reinforcement of cutter teeth of drill bits was developed to study the impact of process conditions on their resistance to impact-abrasive wear. As independent variables, otherwise the factors determining the technological process modes of centrifugal reinforcement were selected X_1, X_2, X_3, X_4 , their main level and intervals of variation, the upper and lower levels were established. A full factor experiment 2^4 was used in the research. An experimental plan was drawn up. In accordance with the chosen plan, 16 active experiments were performed; each experiment was repeated three times. Then, a mathematical model and its describing regression equation were developed. The impact degree of process factors on the value of shock-abrasive wear of teeth and their optimum values were determined.

Keywords: centrifugal reinforcement, durability, wear, tooth, mathematical model, factors.

Вступ

Ефективність бурових доліт значною мірою залежить від роботоздатності породоруйнівного інструменту, який використовують для руйнування гірських порід механічними способами. Серед останніх широко застосування отримав спосіб обертового буріння шарошковими долотами, яким виконується до 96% об'ємів буріння [1-6]. Основним робочим елементом таких доліт є шарошки з зубчастим твердосплавним озброєнням, виконаним у вигляді суцільних або вставних зубців [7,8]. При цьому все більшого поширення набувають шарошки із вставними зубками. Використання для виготовлення вставних зубків твердих сплавів або реліту дозволяє підвищити продуктивність бурових робіт при розробці свердловин на наф-

ту або газ, а також при різних видах прохідницьких робіт у гірничодобуванні. Однак недостатньо висока довговічність шарошок, оснащених вставними зубками, знижує економічний ефект від їх використання. Відомо, що при бурінні поряд із руйнуванням гірських порід відбувається і зношування бурильного інструменту і, передусім, його породоруйнівних елементів. Контактуючи із гірською породою, вони піддаються інтенсивному зношуванню під дією високих навантажень на вибої, значним температурним перепадам в присутності абразиву та постійним змінам товщини пластів і твердості порід. Одним із шляхів розв'язання задачі зі зменшення впливу вказаних чинників на ефективність бурових робіт є комплексний підхід до процесів створення породоруйнівного осна-

щення – починаючи від конструювання і закінчуючи технологічним забезпеченням його виготовлення. При цьому реалізується основна вимога, що ставиться до оснащення породоруйнівного інструменту – забезпечення його високої стійкості до різних видів зносу. Вказана характеристика значною мірою залежить як від обраного породоруйнівного матеріалу, так і від розташування в них армованої зони. Остання може розташовуватися як на поверхні зубчастого оснащення, так і в його об'ємі.

Складні умови роботи породоруйнівного інструменту (зокрема бурильних доліт) та високі вимоги до фізико-механічних властивостей їх оснащення вимагають розробки і створення об'ємних локальних композиційних матеріалів, розміщених на поверхнях, що визначають довговічність виробу загалом, а також розробки промислових технологічних процесів їх виготовлення з автоматичним отриманням диференційованих властивостей. Сутність таких композицій полягає в тому, що в об'ємі оснащення створюється армована зона з використанням зносостійких твердих сплавів і металевих матриць. Регулювання процесів розчинення твердого сплаву і додаткового легування металозв'язки об'ємно-армованої зони дозволяє поряд з концентрацією твердого сплаву створювати оптимальні композиції з набором диференційованих властивостей, що задаються на стадії виготовлення за рахунок їх автоматичного регулювання.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

На сьогодні відомо чимало розробок стосовно зазначеної проблематики. Так, в роботах [9, 10] розглядаються процеси виготовлення шарошкових доліт із зубками, сформованими на їх корпусі, наприклад, фрезеруванням або литвом з подальшим наплавленням на їх робочих поверхнях твердих армуючих матеріалів (релітом, твердих сплавів типу ВК або ТК). Одним з конструктивних і технологічних недоліків таких зубків є постійна необхідність вирішення задачі вибору оптимальної форми і розмірів армованої зони та неможливість при її формуванні стабільно підтримувати термоцикли або зберігати технологічні матеріали. В праці [11] розглядаються шарошки із вставними твердосплавними зубками. Для таких зубків характерне неефективне використання дефіцитних твердих сплавів, оскільки більша частина їх об'єму запресовується в корпус шарошки. Крім того, при експлуатації відбувається сколювання та випадання зубків, що призводить до

потрапляння їх у вибій, що спричиняє руйнування ними бурового долота.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

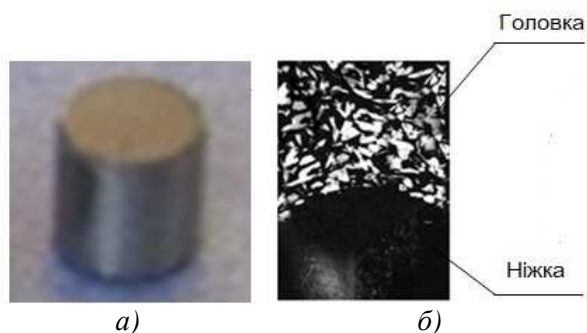
Вказані вище недоліки зубків (як суцільних, так і вставних) значною мірою можна вирішити конструктивно шляхом вдосконалення їх будови. При цьому армуючі матеріали розміщуються тільки в головці зубків. Ніжка зубка, що запресовується в корпус породоруйнівного інструмента, виконується із сталі. Реалізація виготовлення таких зубків ґрунтується на використанні технології відцентрового литва [12]. Розташування твердого сплаву в головці зубка відповідає її технологічному призначенню – руйнування гірської породи, а також дозволяє збільшувати поверхню армування за рахунок відповідної зміни форми головки і зони армування.

Постановка задачі

Метою даної роботи буде побудова математичної моделі технологічного процесу відцентрового армування зубків шарошкових доліт для визначення впливу режимів процесу на їх зносостійкість.

Виклад матеріалу дослідження

Процес формування властивостей зубків шарошок відцентровим армуванням обумовлений великою кількістю факторів, які часто є випадковими, тож для його дослідження доцільно, як до стохастичного процесу, застосовувати метод планування експериментів. За параметр оптимізації нами обрано величину розмірного спрацювання (зносу) зубків. Для проведення дослідів використовували зразки рис. 1.



а – зовнішній вигляд, б – макроструктура

Рисунок 1 – Зубок із плоскою формою головки, армованою релітом

Матеріал зразків – сталь 18ХН2МФЛ. Зміцнення зубків здійснювали релітом із розміром зерен 0,63...0,9 мм. Процес зміцнення (арму-

вання) проводився в такій послідовності: попередньо підігріта ливарна форма встановлюється на установку відцентрового литва і приводиться в рух. В форму, що обертається, одночасно вводиться розплавлений метал і твердий сплав. При цьому кожне зерно твердого сплаву оточене рідким металом. Під час його руху до периферії форми відбувається оплавлення зерен по границях контакту, чим забезпечується надійне закріплення зерен твердого сплаву в матриці. Рух зерен до периферії форми здійснюється під дією відцентрових сил, оскільки густина зерен твердого сплаву більша за густину сталі.

Процеси, які відбуваються в зоні армування, пов'язані з технологічними параметрами армування виливок. Регулюючи їх, можна одержати оптимальну структуру металозв'язки і форму армованої зони, які забезпечують стійкість шарошок бурових доліт до зношування.

На підставі результатів аналізу визначимо фактори, що характеризують режими технологічного процесу відцентрового армування зубків, а саме:

X_1 - температура заливання сталі, $^{\circ}\text{C}$;

X_2 - кількість введенного твердого сплаву, г;

X_3 - частота обертання відцентрової машини при заливанні сталі, хв^{-1} ;

X_4 - температура нагрівання керамічної форми, $^{\circ}\text{C}$.

Розглянемо побудову моделі повного факторного експерименту для процесу об'ємного армування зубків [13, 14]. На першому етапі будемо лінійну модель, що описується залежністю

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

де y - вибіркова оцінка зношування зубків у факторному просторі (параметр оптимізації) зубка;

b_0 - вільний член рівняння, що враховує вплив усіх інших факторів процесу формування армованої зони зубка;

b_i - коефіцієнт пропорційності при факторі, що досліджується;

x_i - кодове значення фактору, що досліджується.

Дослідні зубки вивчалися на підставі матриці планування експерименту, що реалізує повний факторний експеримент $N = 2^k = 2^4 = 16$. Основний рівень факторів і інтервал їх зміни обрано з результатів аналізу попередньо проведених дослідів та прийнято варіювати на двох рівнях. Інтервали зміни факторів та їх величини в натуральному масштабі

на основному верхньому та нижньому рівнях записаних в таблиці.

Інтервали зміни і точність підтримання вхідних змінних наведені в табл. 1 і обрані з урахуванням рівня відтворюваності і отримання істотних змін вихідних параметрів.

Таблиця 1 – Інтервали варіювання і точність підтримання вхідних змінних

Фактор	Рівень факторів			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
$X_1, ^{\circ}\text{C}$	1520	1570	1620	50
$X_2, \text{г}$	32	94	156	62
$X_3, \text{хв}^{-1}$	400	500	600	100
$X_4, ^{\circ}\text{C}$	100	200	300	100

Кодування значень факторів x_i виконували за виразом

$$x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (2)$$

де Δx_i - інтервал варіювання значення i -го фактора в кодовому масштабі;

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}, \quad (3)$$

де x_i - значення i -того фактора в натуральному масштабі на максимальному або мінімальному рівнях;

x_{i0} - середнє значення i -го фактора в натуральному масштабі.

Дослідження зносу армованих зубків реалізовано тричі, вимірюванням зносу зубка (середнє з трьох) мікрометричним методом.

В таблиці 2 наведено план експериментів у кодовому масштабі.

Таблиця 2 – Матриця планування

План	№ дослідів	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4
2^4	1	+	-	-	-	-
	2	+	-	-	-	+
	3	+	-	-	+	-
	4	+	-	-	+	+
	5	+	-	+	-	-
	6	+	-	+	-	+
	7	+	-	+	+	-
	8	+	-	+	+	+
	9	+	+	-	-	-
	10	+	+	-	-	+
	11	+	+	-	+	-
	12	+	+	-	+	+
	13	+	+	+	-	-
	14	+	+	+	-	+
	15	+	+	+	+	-
	16	+	+	+	+	+

Таблиця 3 – Розрахунок дисперсії дослідів

Номер дослідів	Номер дубля j та спрацювання зубка y_{ju} , мм			Середнє значення \bar{y}_j	Дисперсія дослідів S_{yu}^2
	1	2	3		
1	3,02	3,08	3,23	3,11	0,011
2	3,17	3,39	3,10	3,22	0,022
3	2,83	2,90	3,01	2,91	0,008
4	2,97	3,0	3,08	3,05	0,014
5	2,77	2,36	2,82	2,65	0,048
6	2,60	2,29	2,35	2,41	0,026
7	2,77	2,64	2,45	2,62	0,050
8	2,46	2,21	2,25	2,31	0,019
9	2,51	2,09	2,90	2,70	0,026
10	2,73	3,02	2,92	2,89	0,019
11	2,67	2,63	2,35	2,55	0,017
12	2,71	2,82	2,73	2,75	0,015
13	2,17	2,18	2,40	2,25	0,025
14	2,39	2,18	2,06	2,21	0,018
15	1,97	2,14	2,04	2,05	0,015
16	2,09	2,30	2,21	2,20	0,015

Дисперсія дослідів визначалася за відомим виразом

$$S_{yu}^2 = \frac{\sum (y_{ju} - \bar{y}_u)^2}{n_u - 1}, \quad (4)$$

де n_u - кількість дублів j кожного u -го дослідів (випробування);

u - номер дослідів (загальна кількість яких $N=16$);

y_{ju} - результат j -го дослідів u -му рядку ($j=3$).

В табл. 3 наведені дані розрахунків за результатами проведених дослідів, для кожного з яких розраховані початкові дисперсії S_{yu}^2 .

Наступна дія в обробці експериментальних даних – перевірка однорідності дослідів дисперсій S_{yu}^2 за критерієм Кохрена (інакше за G -критерієм)

$$G^{розр} = \frac{S_{yu}^2 \max}{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2} = \frac{0,05}{0,348} = 0,144, \quad (5)$$

де S_{yu}^2 - дисперсія u -го дослідів;

$S_{yu}^2 \max$ - найбільша дисперсія.

При рівні значущості $\alpha = 0,05$, числі степенів вільності $f = n - 1 = 2$ та кількості дослідів $N=16$, табличне значення G -критерію становить $G^{табл}=0,322$ [15]. Оскільки виконується

умова $G^{розр} \leq G^{табл}$, тобто $0,144 < 0,322$ ряд дисперсій можна вважати однорідним. І, таким чином, розсіювання результатів дослідів випробувань y_u відповідають нормальному закону розподілу і дисперсію дослідів можна визначити за формулою

$$S_{yu}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2}{N} = \frac{0,348}{16} = 0,022. \quad (6)$$

Кількість ступенів вільності при цьому визначається за формулою $f = (n - 1)N = (3 - 1) \cdot 16 = 32$.

Далі розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії (1), що буде описувати нашу модель процесу. За даними таблиці визначаємо коефіцієнти b_0, b_i . Вільний коефіцієнт b_0 розраховуємо за відомим виразом

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u. \quad (7)$$

Коефіцієнти регресії b_i визначаємо за рівнянням

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (8)$$

де i – номер фактора;

u – номер дослідів;

N – загальне число дослідів;

x_{iu} - кодове значення;

y_u - значення параметра оптимізації u -му дослідів.

Таблиця 4 – Зіставлення експериментальних і розрахункових даних

Номер досліджу u	$y_{u\text{експ}}$	$y_{u\text{розрах}}$	$ \Delta y $	Δy^2	Номер досліджу u	$y_{u\text{експ}}$	$y_{u\text{розрах}}$	$ \Delta y $	Δy^2
1	3,11	3,13	0,02	0,0004	9	2,70	2,79	0,09	0,0081
2	3,22	3,13	0,09	0,0081	10	2,89	2,79	0,10	0,0100
3	2,91	3,01	0,10	0,0100	11	2,55	2,67	0,12	0,0144
4	3,05	3,01	0,04	0,0016	12	2,75	2,67	0,08	0,0064
5	2,65	2,57	0,08	0,0064	13	2,25	2,23	0,02	0,0004
6	2,41	2,57	0,16	0,0256	14	2,21	2,23	0,02	0,0004
7	2,62	2,45	0,17	0,0289	15	2,05	2,11	0,06	0,0036
8	2,31	2,45	0,14	0,0196	16	2,20	2,11	0,09	0,0081

Було отримано такі значення коефіцієнтів, визначених за формулами (7), (8):

$$b_0 = 2,62; b_1 = -0,17; b_2 = -0,28; \\ b_3 = -0,06; b_4 = 0,013.$$

Проведемо перевірку статичної значущості коефіцієнтів. Для цього необхідно порівняти певний критерій, розрахований заданими дослідів, з наведеним в стандартних таблицях його значенням при обраному рівні значущості α . Для перевірки наведеної вище гіпотези спочатку розраховуємо дисперсію оцінок коефіцієнтів S_{bi}^2

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N} = \frac{0,022}{3 \cdot 16} = 0,000458.$$

Відповідно середньоквадратична похибка становить $S_{bi} = 0,0214$.

Далі підраховуємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δb_i

$$\Delta b_i = \tau_{\alpha;f} \cdot S_{bi}, \quad (9)$$

де τ_{α} - критерій Стьюдента. Він береться з таблиць залежно від рівня значущості α і кількості ступенів вільності f_i при визначенні дисперсії дослідів S_y^2 ;

S_{bi} - середньоквадратична похибка у визначенні коефіцієнта регресії

$$\tau_{0,05;32} = 2,04 \text{ [15]}$$

$$\text{Тоді } \Delta b_i = 2,04 \cdot 0,0214 = 0,044.$$

Як відомо, коефіцієнт буде статично значущим, коли $|b_i| \geq \Delta b_i$. Або інакше $|b_i| \geq \tau_{\alpha;f} \cdot S_{bi}$. Останнє означає, що абсолютна величина коефіцієнта повинна бути в τ разів більша, ніж похибка його визначеності.

Таким чином, коефіцієнти, абсолютна величина яких рівна довірчому інтервалу або більша від нього, слід вважати статично значущими. В нашому випадку це b_0, b_1, b_2 . Статично

незначні коефіцієнти b_3, b_4 з моделі можна виключити.

Отже, після реалізації повного факторного експерименту 2^4 отримаємо рівняння регресії

$$y = 2,62 - 0,17x_1 - 0,28x_2 - 0,06x_3. \quad (10)$$

Виконаємо перевірку адекватності моделі. З цією метою з її рівняння визначаємо розрахункові значення параметра оптимізації та зведемо їх в таблицю 4, зіставивши їх із експериментальними даними.

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum |\Delta y|}{f_2}, \quad (11)$$

де $|\Delta y| = |y_{u\text{розрах}} - y_{u\text{експ}}|$ - різниця значень u -му досліді розраховано за рівнянням регресії параметра оптимізації та його експериментальним значенням;

f_2 - кількість ступенів вільності

$$f_2 = N - k,$$

де N - кількість дослідів $N=16$,

k - кількість коефіцієнтів у рівнянні регресії $k=4, f_2=16-4=12$.

$$\text{Отже, маємо } S_{неад}^2 = \frac{0,152}{12} = 0,012.$$

Гіпотезу про адекватність моделі перевіримо за допомогою F -критерію (критерію Фішера). Його розрахункове значення визначаємо за формулою

$$F_{f_2;f_1}^{розрах} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (12)$$

де S_y^2 - дисперсія дослідів визначена за ступеня вільності f_1 ,

$S_{неад}^2$ - дисперсія неадекватності визначена за ступеня вільності f_2 .

Таким чином, розрахункова величина F -критерію буде така:

$$F_{f_2, f_1}^{розрах} = \frac{0,012}{0,022} = 0,530.$$

Модель вважається адекватною у випадку, коли розрахункове значення критерію Фішера буде меншим табличного значення $F^{розрах} \leq F^{табл}$. Табличне значення F -критерію при рівні значущості $\alpha=0,05$ складає $F_{0,05;12;32}^{табл} = 2,09$.

Порівнюючи значення розрахункового та табличного F -критеріїв, можна зробити висновок про адекватність досліджуваної моделі, оскільки $F^{розрах} = 0,053 < F^{табл} = 2,09$.

Висновки

На основі конструкторсько-технологічного аналізу методів виготовлення зубків, армованих твердим сплавом, було обрано для досліджень метод відцентрового армування зубків як найбільш оптимальний.

Побудовано модель процесу зміцнення релітом зубків шарошок бурових доліт у вигляді лінійного поліному.

На підставі рівняння регресії, яке описує модель, встановлено, що за рівнем значущості фактори, які визначають режими відцентрового армування зубків, розміщуються в такій послідовності:

- X_2 – кількість введеного реліту, X_1 – температура заливання сталі, X_3 – частота обертання відцентрової машини при заливанні сталі;
- збільшення значень факторів X_1, X_2, X_3 призводить до зменшення зносу зубків;
- регулювання параметрів режимів X_1, X_2, X_3 дозволяє виготовляти зубки з найменшим зносом.

В наступних дослідженнях планується вивчення процесу відцентрового армування з двома осями обертання ливарної форми.

Література

1. Буровой породоразрушающий инструмент. Шарошечные долота : международный транслятор-справочник / под ред. В. Я. Кершенбаума, А. В. Торгашева, А. Г. Мессера. М. : Национальный институт нефти и газа, 2003. Т. 1. 257 с.
2. Каталог буровых долот компании Hughes Christensen / [сост. Хьюз Кристенсен]. М. : Бейкер Хьюз Инкорпорейтед, 2008. 44 с.
- 3 Smith Tool. Передовая технология оптимального проведения буровых работ : каталог / [сост. Smith International]. М. : Смит Интернэшнл, ИНК, 1998. 23 с.

4. Smith Bits: каталог продукции 2007-2008: каталог / [сост. Smith International]. U.S.A. Texas, Houston : Smith International, Inc., 2007. 65 с.

5. Каталог продукції для нафтової та газової промисловості: каталог / [авт.: ВАТ „Дрогобицький долотний завод“]. Дрогобич : ДДЗ, 2008. 57 с.

6. Волгабурмаш. Буровые долота : каталог буровых долот / [сост. ОАО «ВБМ»]. М. : ОАО «ВБМ-сервис», 2006. 48 с.

7. Шуляр І. О. Технологічні шляхи підвищення якості армованої зони виливків бурового інструменту. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. 2013. № 1 (63). С. 70–78.

8. Неупокоев В. Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот. Самара : Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. 376 с.

9. Ясашин В. А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра: автореф. дисс. ... докт. техн. наук : спец. 05.02.13 “Машины, агрегаты и процессы (нефтяная и газовая промышленность)” [Текст]. М., 2009. 48 с

10. Яким Р., Петрина Ю., Яким І. Конструкторсько-технологічне забезпечення якості тришарошкових бурових доліт. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції (Тернопіль 19 - 21 травня 2010 р.) / М-во освіти і науки України, Нац. Академія наук України [та ін.]. Тернопіль : ТНТУ, 2010. С. 245 - 246.

11. Барило И. Г. Повышение износостойкости вооружения долот за счет использования комбинированных твердосплавных зубков: дис. ... канд. тех. Наук : 05.02.01. М., 1989. 178 с.

12. Бугай Ю. Н., Воробьев И. В. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент. Львов : Выща школа, 1989. 205 с.

13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 281 с.

14. Петрина Ю. Д., Яким Р. С. Основи наукових досліджень для інженерів. Івано-Франківськ : Факел, 2004. 153 с.

15. Пляскин И. И. Планирование эксперимента в машиностроении. М. : Машиностроение, 1982. 176 с.

References

1. Burovoj porodozruchayushij instrument. Sharoshechnye dolota: mezhdunarodnyj translyator-spravochnik / pod red. V. Ya. Kershenbauma, A. V. Torgasheva, A. G. Messera. M. : Nacionalnyj institut nefti i gaza, 2003. T. 1. 2003. – 257 p.
2. Katalog burovih dolot kompanii Hughes Christensen / [sost. Hyuz Kristensen]. M. : Bejker Hyuz Inkorporejted, 2008. 44 p.
3. Smith Tool. Peredovaya tehnologiya optimalnogo provedeniya burovih. rabot: katalog / [sost. Smith International]. M. : Smit Interneshnl, INK, 1998. 23 p.
4. Smith Bits: katalog produkci 2007-2008: katalog / [sost. Smith International]. U.S.A. Texas, Houston: Smith International, Inc., 2007. 65 p.
5. Katalog produkciyi dlya naftovoyi ta gazovoyi promislovosti: katalog / [avt.: VAT „Drogobickij dolotnij zavod“]. Drogobich : DDZ, 2008. 57 p.
6. Volgaburmash. Burovye dolota: katalog burovih dolot [sost. OAO «VBM»]. M. : OAO «VBM-servis», 2006. 48 p.
7. Shulyar I. O. Tehnologichni shlyahi pidvishennya yakosti armovanoyi zoni vilivkiv burovogo instrumentu. *Visnik Chernigivskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*. 2013. No 1 (63). P. 70–78.
8. Neupokoev V. G. Voprosy teorii i praktiki proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatsii burovih sharoshechnih dolot. Samara : Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2000. 376 p.
9. Yasashin V. A. Konstruktorskie i tehnologicheskie metody povysheniya effektivnosti raboty burovih sharoshechnih dolot bolshogo diametra : avtoref. diss. ... dokt. tehn. nauk: spec. 05.02.13 “Mashiny, agregaty i processy (neftyanaya i gazovaya promyshlennost)” [Tekst]. M., 2009. 48 p.
10. Yakym R., Petryna Yu., Yakym I. Konstruktorsko-tehnologichne zabezpechennya yakosti trisharoshkovih burovih dolit. *Fundamentalni ta prikladni problemi suchasnih tehnologij* : materialy mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferencii (Ternopil 19 - 21 travnya 2010 r.) / M-vo osvity i nauky Ukrayiny, Nac. Akademiya nauk Ukrayiny [ta in.]. Ternopil : TNTU, 2010. P. 245-246.
11. Barilo I. G. Povyszenie iznosostojkosti vooruzheniya dolot za schet ispolzovaniya kombinirovannyh tverdosplavnyh zubkov: dis. ... kand. teh. nauk: 05.02.01. M., 1989. 178 p.
12. Bugaj Yu. N., Vorobev I. V. Centrobezhno-armirovannyj porodozruchayushij burovij instrument. Lvov : Vysha shkola, 1989. 205 p.
13. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnih uslovij. M. : Nauka, 1976. 281 p.
14. Petrina Yu. D., Yakim R. S. Osnovi naukovykh doslidzhen dlya inzheneriv. Ivano-Frankivsk : Fakel, 2004. 153 p.
15. Plyaskin I.I. Planirovanie eksperimenta v mashinostroenii. M. : Mashinostroenie, 1982. 176 p.