

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВІДЦЕНТРОВОГО АРМУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Л. Я. Роп'як

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник, доцент*
E-mail: l_ropjak@ukr.net

І. О. Шуляр

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: bogdan.shuliar@gmail.com

О. М. Богаченко

Інженер*
E-mail: bogachenko51@i.ua
*Кандидат фізики та комп'ютеризованого
машинобудівного виробництва
Івано-Франківський національний
технічний університет «Північний захід»
вул. Криворізька, 15,
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

Проведено аналіз методів поверхнево-го і об'ємного армування для підвищення зносостійкості деталей. Обґрунтовано переваги застосування методу відцентрового армування заготовок деталей з двома взаємно перпендикулярними осями обертання керамічної ливарної форми для забезпечення отримання зміцненої зони із заданими властивостями. Досліджено вплив технологічних параметрів відцентрового армування сталевих деталей частинками карбїду вольфраму в процесі литва на концентрацію та зношення робочої зони з використанням математичного планування експерименту

Ключові слова: технологічні параметри, відцентрове армування, частинки карбїду вольфраму, концентрація, зносостійкість

Проведен анализ методов поверхностного и объемного армирования для повышения износостойкости деталей. Обоснованы преимущества применения метода центробежного армирования заготовок деталей с двумя взаимно перпендикулярными осями вращения керамической литейной формы для обеспечения получения упрочненной зоны с заданными свойствами. Исследовано влияние технологических параметров центробежного армирования стальных деталей частицами карбида вольфрама в процессе литья на концентрацию и износ рабочей зоны с использованием математического планирования эксперимента

Ключевые слова: технологические параметры, центробежное армирование, частицы карбида вольфрама, концентрация, износостойкость

1. Вступ

У машинобудівній галузі останні роки склалася тенденція до широкого використання зміцнюючих технологій для підвищення зносостійкості та довговічності деталей машин. Бурове і нефтогазове промислове обладнання експлуатується в складних умовах при високих тисках, гресивних середовищах, які містять у своєму складі абразивні частинки гірської породи. Для деталей цього обладнання характерною є значна частота геометричних розмірів у результаті зношення. Техніко-економічні показники роботи обладнання, машин, механізмів та інструментів залежать від зносостійкості робочих поверхонь деталей. Тому при конструюванні та розробленні технологічних процесів виготовлення деталей особливо увагу приділяють питанням підвищення їх довговічності з урахуванням формування робочої зони деталей з високими показниками якості. Тому розроблення і оптимізація методів зміцнення для підвищення якості поверхонь деталей машин є актуальним і ефективним завданням, яке вимагає розроблення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Науково-технічний прогрес у галузі машинобудівництва сприяв розвитку технологій несення зносостійких покриттів, які містять тугоплавкі сполуки, що характеризуються високою твердістю. Останнім часом найбільш поширеними методами несення зносостійких шарів є електродугове наплавлення [1–3], газополум'яне [4, 5], плазменне пиління [6], лазерне наплавлення [7], а також комбінація цих методів [8]. При цьому якості робочих поверхонь в основному використовують карбїди вольфраму і хрому та нікелевії, кобальтові, мельхіорові [9] і залізні основи. Оскільки властивості карбїдів проявляють значну хімічну активність, в деяких випадках для забезпечення отримання спеціального комплексу властивостей з'єднують сполуки ніобію та танталу [10, 11] у зв'язці з високолегковими сталевими. Однак такі технології дозволяють отримувати шарів відносно невеликих товщин і вони мають обмежене застосування для підвищення зносостійкості деталей бурового обладнання. В роботі [12] запропоновано використовувати композиційні матеріали

зовмісні матеріали, які характеризуються високою зносостійкістю, але є дорогими і зі складними умовами роботи.

Серед функціонально орієнтованих технологій, які забезпечують формування зміцненої робочої зони деталей машин з високими показниками якості, слід відмітити відцентрове рмування. Розрізняють відцентрове рмування з однією постійною віссю (вертикальною або горизонтальною) [13], із змінною віссю (похилою) [14] та з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми [15]. Для відцентрового рмування застосовують рмувальні машини з питомою вагою більшою від стандартної зв'язки [13–15] бонувати [16].

Для оцінювання впливу технологічних параметрів відцентрового рмування з готовок з однією постійною (вертикальною) віссю обертання ливарної форми на стійкість до бурзвального впливу зношування використовують модель [13], однак з нею неможливо оптимізувати технологічний процес. Результати дослідження процесу відцентрового рмування, представлені в роботі [14–16], також вказують на складні залежності руху твердих рмувальних частинок у розплавленій сталі.

Проведені теоретичні дослідження процесу відцентрового рмування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання [17] свідчать про нелінійний характер впливу технологічних параметрів процесу, зокрема, частота обертання ливарної камери мічної форми навколо вертикальної горизонтальної осей в теорії руху частинки, для забезпечення їх попадання в робочу зону з готовки деталі. Однак у цих теоретичних дослідженнях не враховували впливу температури нагрівання ливарної камери мічної форми та рмувальних частинок на формування рмувальної зони виливок, що ускладнює оптимізацію технологічних параметрів процесу відцентрового рмування.

Наведені у технічній літературі дані не дають можливості здійснювати оптимізацію технологічних параметрів процесу відцентрового рмування виливок, що стримує широке застосування технології відцентрового рмування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної камери мічної форми.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень впливу технологічних параметрів процесу відцентрового рмування з урахуванням чисел обертання навколо горизонтальної та вертикальної осей і температури нагрівання ливарної камери мічної форми та рмувальних частинок.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи є побудова математичної моделі процесу відцентрового рмування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної камери мічної форми і встановлення оптимальних значень технологічних параметрів для забезпечення отримання максимальної концентрації частинки карбіду вольфраму в робочій зоні вступних зубців бурових доліт та їх мінімального зношування.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:
– побудувати математичну модель та дослідити вплив технологічних параметрів процесу відцентро-

вого рмування на величину концентрації частинки карбіду вольфраму в робочій зоні та її зносостійкість;

– визначити оптимальні значення технологічних параметрів процесу відцентрового рмування, які забезпечують максимальну величину концентрації частинки карбіду вольфраму в робочій зоні та мінімальне зношування.

4. Матеріали та методи дослідження впливу технологічних параметрів відцентрового армування на концентрацію частинок карбіду вольфраму та зношення робочої зони

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експериментальних дослідженнях

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу відцентрового рмування на експлуатаційні властивості вступних зубців бурових доліт використовували розроблену на кафедрі комп'ютеризованого машинобудівного виробництва Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Україна) установку з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми, як була модернізована і споряджена втоматизованою системою керування [15]. Матеріалом трицилиндрового сталевих 18ХН2МФЛ. Температурний розподіл у тріщині сталі в процесі відцентрового рмування становив 1600–1630 °С. Як рмувальні машини застосовували карбід вольфраму з питомою густиною $\rho=15,7 \text{ г/см}^3$. Грануляція рмувальних частинок складала 1,0 мм. Ливарні камери мічної форми виготовляли з витоплюваними моделями за стандартною технологією.

4.2. Методика досліджень

Концентрація частинки карбіду вольфраму ($Y_k, \%$) в робочій рмувальної зони зразків визначали пліметричним методом методом логарифмічних мікрошліфів. Випробовування зношування ($Y_3, \text{ г}$) проводили на установці з методикою, описаною в роботі [12].

4.3. Методика планування експериментальних досліджень

Як план проведення експерименту для отримання регресійних моделей (тобто з залежностей концентрації частинки карбіду вольфраму та зносостійкості від частоти обертання ливарної камери мічної форми навколо горизонтальної n_x і вертикальної осей n_z) температури нагрівання ливарної камери мічної форми T_ϕ і рмувальних частинок карбіду вольфраму X_1 для оптимізації технологічних параметрів процесу відцентрового рмування був вибраний ротативний центральний композиційний план (РЦКП) [18]: $Y_k = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a)$; $Y_3 = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a)$.

При цьому виді експерименту досліді проводять з матрицею, яка містить три групи дослідів, які розміщені симетрично і на однаковій відстані від центру експерименту:

1) ядром є повнофакторний експеримент 2^4 ;
2) досліді, що проводяться у «зіркових» точках факторного простору;

3) досліді у центрі експерименту.

Згідно з кількістю дослідів у ротативному центральному композиційному експерименті з лежить

від кількості факторів. Вибір чисел і координат «зіркових» точок повинно задовольняти наступним вимогам:

а) загальна кількість дослідів значно перевищує число коефіцієнтів регресії;

б) фактори змінюються на невеликому числі рівнів.

Залежно від прийнятого принципу оптимальності м. тричі плану експерименту, тобто від способу вибору величини зіркового плеча α і чисел дослідів в центрі експерименту, розрізняють ротативний і ортогональний плани. Найбільшого поширення в практиці досліджень набув ротативний план експерименту згідно з яким матриці РЦКП повинні мати властивість ротативності, тобто на основі отриманої математичної моделі значення параметра оптимізації у різних точках факторного простору, розміщених на однаковій відстані від центру експерименту, повинні мати мінімальні рівні дисперсії. Число дослідів в центрі експерименту повинні збезпечувати дисперсію передбаченого значення U всередині області експерименту постійну і незалежну від відстані до центру експерименту.

РЦКЕ проводять на п'яти координатах рівнях $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$, тому інтервал зміни факторів повинен бути таким, щоб ділянку зміни його охоплює встановлений область факторного простору (табл. 1).

Таблиця 1

План проведення технологічних експериментів типу РЦКП

Номер дослідів	Рівні факторів					Параметр оптимізації, U			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	повторюваність дослідів			середнє значення
						1	2	3	$U_{ср}$
1	1	-1	-1	-1	-1	U_{11}	U_{12}	U_{13}	$U_{1с}$
2	1	-1	-1	-1	1	U_{21}	U_{22}	U_{23}	$U_{2с}$
3	1	-1	-1	1	-1	U_{31}	U_{32}	U_{33}	$U_{3с}$
4	1	-1	-1	1	1	U_{41}	U_{42}	U_{43}	$U_{4с}$
5	1	-1	1	-1	-1	U_{51}	U_{52}	U_{53}	$U_{5с}$
6	1	-1	1	-1	1	U_{61}	U_{62}	U_{63}	$U_{6с}$
7	1	-1	1	1	-1	U_{71}	U_{72}	U_{73}	$U_{7с}$
8	1	-1	1	1	1	U_{81}	U_{82}	U_{83}	$U_{8с}$
9	1	1	-1	-1	-1	U_{91}	U_{92}	U_{93}	$U_{9с}$
10	1	1	-1	-1	1	U_{101}	U_{102}	U_{103}	$U_{10с}$
11	1	1	-1	1	-1	U_{111}	U_{112}	U_{113}	$U_{11с}$
12	1	1	-1	1	1	U_{121}	U_{122}	U_{123}	$U_{12с}$
13	1	1	1	-1	-1	U_{131}	U_{132}	U_{133}	$U_{13с}$
14	1	1	1	-1	1	U_{141}	U_{142}	U_{143}	$U_{14с}$
15	1	1	1	1	-1	U_{151}	U_{152}	U_{153}	$U_{15с}$
16	1	1	1	1	1	U_{161}	U_{162}	U_{163}	$U_{16с}$
17	1	-2	0	0	0	U_{171}	U_{172}	U_{173}	$U_{17с}$
18	1	2	0	0	0	U_{181}	U_{182}	U_{183}	$U_{18с}$
19	1	0	-2	0	0	U_{191}	U_{192}	U_{193}	$U_{19с}$
20	1	0	2	0	0	U_{201}	U_{202}	U_{203}	$U_{20с}$
21	1	0	0	-2	0	U_{211}	U_{212}	U_{213}	$U_{21с}$
22	1	0	0	2	0	U_{221}	U_{222}	U_{223}	$U_{22с}$
23	1	0	0	0	-2	U_{231}	U_{232}	U_{233}	$U_{23с}$
24	1	0	0	0	2	U_{241}	U_{242}	U_{243}	$U_{24с}$
25	1	0	0	0	0	U_{251}	U_{252}	U_{253}	$U_{25с}$
26	1	0	0	0	0	U_{261}	U_{262}	U_{263}	$U_{26с}$

Оскільки технологічні параметри процесу відцентрового рмування (незалежні фактори n_x, n_y, T_f, T_a)

мають різні одиниці вимірювання, їх числові значення різні величини, то для спрощення проведення розрахунків при визначенні коефіцієнтів поліном здійснюють перехід від дійсних значень до координатних.

Залежність між координатами x_i та натуральними X_i значеннями змінних для i -го фактору визначають формулою [8]

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \tag{1}$$

де X_i – натуральне значення фактору на нижньому (верхньому) рівні; X_{i0} – натуральне значення фактору на нульовому рівні; ΔX_i – інтервал рівняння натуральних значень фактору відносно нульового рівня.

Нульовий рівень натурального значення фактору розраховували за формулою [8]

$$X_{i0} = \frac{X_{maxi} + X_{mini}}{2}, \tag{2}$$

де X_{maxi} – максимальне натуральне значення (верхній рівень) фактору; X_{mini} – мінімальне натуральне значення (нижній рівень) фактору.

Інтервал рівняння i -го фактору визначають за формулою [8]

$$\Delta X_i = \frac{X_{maxi} - X_{mini}}{2}. \tag{3}$$

Основними параметрами технологічного процесу відцентрового рмування, які були вибрані як змінні фактори при проведенні експерименту вибрано:

X_1 – кількість обертів ливарної кермічної форми навколо горизонтальної осі;

X_2 – кількість обертів ливарної кермічної форми навколо вертикальної осі;

X_3 – температура грівання кермічної ливарної форми;

X_4 – температура грівання рмуємих частинок крбіду вольфраму.

Граничні рівняння технологічних параметрів процесу відцентрового рмування вибрані з тих міркувань:

– чотири обертання ливарної форми навколо горизонтальної та вертикальної осей вибрані з результату комп'ютерного моделювання процесу відцентрового рмування [17] та з урахуванням рекомендацій [13, 15, 16];

– температура грівання ливарної кермічної форми вибрані з умови забезпечення оптимального легування металургійній зоні деталі. З результатів досліджень [13] встановлено, що температура 100–400 °С підвищення температури вище 350–400 °С призводить до підвищення інтенсивності розчинення рмуємих частинок крбіду вольфраму в розтопленій сталі;

– температура грівання рмуємих частинок крбіду вольфраму вибрані з рекомендаціями [13] з умови зменшення ефекту «холодильників» при поділянні частинки в розплавленій металі (нижнє значення 100 °С), з побічним інтенсивному розчиненню у розплавленій сталі (верхнє значення 300 °С).

Досліди проводили з фіксованих розмірів рмуваючих ч стенок, оскільки тректорії руху рмуваючих ч стенок залежать від їх геометричних розмірів (вги) [17], тому як фктор в регресійну модель не вводили діаметр рмуваючої ч стинки, приймали результат мінших методичних дослідів – 1 мм.

РЦКЕ провели п'яти рівнях вріювання фкторів. Узіркових точках ізурхування для чотирьох фкторів величини плечексперименту $\alpha = 2$ твцентрі експерименту.

Вибрані фктори відповідають всім вимогам, які висуваються до них. Точність підтримання технологічних параметрів процесу відцентрового рмування складала 3–5 %. Інтервали вріювання неведені в табл. 2.

Таблиця 2

Кодові та турльні значення фкторів і рівні їх вріювання

Рівні фкторів	Кодові значення				Турльні значення			
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	n _x , об/хв	n _z , об/хв	T _ф , °C	T, °C
Основний рівень	0	0	0	0	180	600	270	210
Інтервал вріювання	1	1	1	1	60	150	65	50
Верхній рівень	+1	+1	+1	+1	240	750	335	260
Нижній рівень	-1	-1	-1	-1	120	450	205	160
Зіркові точки (+)	+2	+2	+2	+2	300	900	400	310
Зіркові точки (-)	-2	-2	-2	-2	60	300	140	110

Щоб виключити вплив нерегульованих і неконтрольованих фкторів (перепідпружинення живлення обідня, температури води для охолодження індукторної температури в латорії) значення параметрів оптимізації, проводили рдомізацію параметрів триці методом випадкового блнсу, релізованим способом випадкових чисел.

Для опису технологічного процесу відцентрового рмування (чотири фктори) використовували поліном другого порядку

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2, \quad (4)$$

де b₀, b₁–b₄, b₁₂–b₃₄, b₁₁–b₄₄ – коефіцієнти, які характеризують вільний член рівняння, лінійні ефекти, ефекти взаємодії та квадратичні ефекти відповідно; x₁, x₂, x₃, x₄ – контрольовані фктори (технологічні параметри процесу відцентрового рмування).

Загальне число коефіцієнтів регресії в поліномі (4) визначили із виводу

$$M_k = \frac{1}{2}(M+1)(M+2), \quad (5)$$

де M – кількість фкторів експерименту (для чотирьох фкторів, M_k = 15).

Матриці РЦКП не володіють властивістю ортогональності, тому коефіцієнти проксимуючого по-

ліном (4) та їх дисперсії розраховували з відомими формулами.

Значущість коефіцієнтів регресії визначили з критерієм Стюдента. Для цього розрахували значення зібрання з табличним значенням коефіцієнтів регресії з абсолютною його довірчою помилкою. Табличне значення критерію Стюдента визначують при p_d = 0,95 і числі степенів вільності дисперсії вихідного параметра, з якою визначили дисперсія коефіцієнтів регресії. Гіпотезу про адекватність моделі другого порядку (тобто відповідність моделі другому реальному технологічному процесу відцентрового рмування) перевіряли з критерієм Фішера.

Досліди (одне число) проводили у всіх трьох групах дослідів матриці планування РЦКЕ, розрахували значення критерію Фішера визначили з відомою методикою. Гіпотезу про адекватність отриманої моделі другого порядку не відкидали, якщо розрахували F_R < F_T, де F_T – табличне значення.

З результатів розрахунків, які проводилися на ПК з використанням прикладної статистичної програми (STATISTIKA), будували поверхні відгуку параметра оптимізації їх двомірні перерізи, та кож визначили оптимальні значення технологічних параметрів процесу відцентрового рмування.

5. Результати дослідження показників якості відцентрово армованих зразків з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми

З метою підтвердження теоретичних обґрунтувань технологічних параметрів процесу відцентрового рмування [17] і встановлення закономірностей зміни концентрації ч стенок крбідувольфрму у_к в робочій зоні комбінованого зубця та його зносостійкості у_з, в залежності від кількості обертів ливарної кермічної форми навколо горизонтальної n_x та вертикальної n_z осей, температури ливарної кермічної форми T_ф і температури рмуваючих ч стенок T виготовили латорні експериментальні зрізки всталих зубців бурових дослідів, отриманих згідно з розробленою технологією відцентрового рмування та дослідили кількість крбідувольфрму в робочій рмовній зоні (Y_к, %) поліномічним методом, та кож провели випробування зношування (Y_з, г) робочої рмовної зони зубців.

Функції відгуку як параметра оптимізації (концентрацію у_к та зносостійкість у_з) будували на основі результатів експериментальних досліджень у вигляді поліном другого порядку (4).

Визначили невідомі коефіцієнти поліному у кодовому вигляді. Після рхування і визначення значущості при рівні 0,05 коефіцієнти зведені до табл. 3.

Останні рівняння регресії, які відображають залежність концентрації рмуваючих ч стенок крбідувольфрму в робочій рмовній зоні комбінованого зубця $y_{k1(x1x2x3x4)} = f(n_x, n_z, T_{\phi}, T)$, та кож його зношування $y_{z1(x1x2x3x4)} = f(n_x, n_z, T_{\phi}, T)$ залежно від зміни частоти обертання ливарної кермічної форми навколо горизонтальної n_x і вертикальної n_z осей, та кож температури ливарної кермічної ливарної форми T_ф і ч стенок крбідувольфрму T з результатів проведених РЦКП у кодових величинах небувають вигляду:

– для концентр ції

$$Y_K = 60,5 + 1,367x_1 + 2,867x_2 - 3,340x_1^2 - 5,240x_2^2 - 1,802x_3^2 - 1,065x_4^2; \quad (6)$$

– для зношув ння

$$Y_3 = 2,120 - 0,168x_1 - 0,275x_2 - 0,046x_3 - 0,067x_2x_4 + 0,154x_1^2 + 0,156x_2^2 + 0,070x_3^2 + 0,079x_4^2. \quad (7)$$

$$Y_K = -123,419 + 0,386n_x + 0,285n_z - 0,001n_x^2 - 0,00023n_z^2 - 0,00003T_\phi^2 - 0,00018T_a^2; \quad (12)$$

– для зношув ння

$$Y_3 = 10,494 - 0,0022n_x - 0,00899n_z - 0,01156T_\phi - 0,00001n_zT_a + 0,00004n_x^2 + 0,00001n_z^2 + 0,00002T_\phi^2 + 0,00003T_a^2. \quad (13)$$

Т блиця 3

Коефіцієнти проксимуючого поліном другого порядку

Коефіцієнт	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₂₄	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃	b ₄₄
Концентр - ція, Y _K	60,5	1,367	2,867	-	-	-3,34	-5,24	-1,802	-1,065
Зношув ння, Y ₃	2,12	-0,168	-0,275	-0,046	-0,067	0,154	0,156	0,070	0,079

Відт к визн ч ли основний рівень т інтерв л його в рівн ння для кожного ф ктор з формулою (2) і (3) відповідно:

– для ч стоти оберт ння лив рної кер мічної форми н вколо горизонт льної осі n_x

$$X_{01} = \frac{240 + 120}{2} = 180 \text{ об/хв};$$

– для ч стоти оберт ння лив рної кер мічної форми н вколо вертика льної осі n_z

$$X_{02} = \frac{750 + 450}{2} = 600 \text{ об/хв};$$

– для темпер тури н грів ння кер мічної лив рної форми T_φ

$$X_{03} = \frac{335 + 205}{2} = 270 \text{ }^\circ\text{C};$$

– для темпер тури підігрів ння рмуючи ч стенок к рбїду вольфр му T

$$X_{04} = \frac{260 + 160}{2} = 210 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Кодов ні зн чення кожного ф ктору н був ли вигляду відповідно до формули (1)

$$\Delta X_1 = \frac{240 - 120}{2} = 60 \text{ об/хв}; \quad x_1 = \frac{n_x - 180}{60}; \quad (8)$$

$$\Delta X_2 = \frac{750 - 450}{2} = 150 \text{ об/хв}; \quad x_2 = \frac{n_z - 600}{150}; \quad (9)$$

$$\Delta X_3 = \frac{335 - 205}{2} = 65 \text{ }^\circ\text{C}; \quad x_3 = \frac{T_\phi - 270}{65}; \quad (10)$$

$$\Delta X_4 = \frac{260 - 160}{2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}; \quad x_4 = \frac{T - 210}{50}. \quad (11)$$

Після підст новки формул (7)–(10), перетворень і спрощень вир зів (5) і (6) рівняння регресії для Y_K і Y₃ у н тур льних величин х н був ють ост точного вигляду:

– для концентр ції

Зн йдені рівняння регресії як в кодов них, т к і в н тур льних величин х можуть використовув тися для визн чення концентр ції рмуючих ч стенок Y_K і зношув ння зубця Y₃ з лежно від зміни ч стоти оберт ння лив рної кер мічної форми н вколо горизонт льної осі n_x, вертика льної осі n_z, темпер тури н грів ння лив рної кер мічної форми T_φ т рмуючих ч стенок к рбїду вольфр му T, які перебув ють в меж х 120 ≤ n_x ≤ 240 об/хв, 450 ≤ n_z ≤ 750 об/хв, 205 ≤ T_φ ≤ 335 °C, 160 ≤ T ≤ 260 °C відповідно.

Для визн чення впливу п р метрів технологічного процесу (змінних ф кторів) н п р метри оптиміз ції будув ли поверхні відгуку п р метрів оптиміз ції т їх двомірні перерізи з лежно від двох змінних чинників x_{i(1,2)} при постійних основних рівнях інших двох чинників x_{i(3,4)}.

Після опр цюв ння експеримент льних д них і перевірки зн чущості коефіцієнтів регресії т декв тності вибр ної м тем тичної моделі другого порядку д ному технологічному процесу відцентрового рму в ння отрим ли проміжні рівняння регресії концентр ції рмуючих ч стенок Y_K і величини зношув ння Y₃ робочої зони комбінов ного зубця в з лежності від впливу двох змінних ф кторів.

Відповідно з рівняннями регресії побудов но поверхні відгуку т двомірні перерізи цих поверхонь концентр ції рмуючих ч стенок в робочій рмов ній зоні т величини зношув ння робочої зони зубця з лежно від двох чинників, коли інші дв з лиш ються ст лимі, рівними зн ченням н основному рівні (рис. 1 і 2).

6. Обговорення результатів дослідження впливу технологічних параметрів процесу відцентрового армування на концентрацію частинок твердого сплаву в робочій зоні та зношування зразків

Ан ліз результ тів, одерж них з рівняннями поверхні відгуку, свідч ть, що величин концентр ції ч стенок к рбїду вольфр му з лежить від п р метрів технологічного процесу, причому більше вплив ють кінем тичні скл дові п р метрів n_x і n_z, ніж темпер турні T_φ і T (рис. 1, 2). Ан логічний вплив технологічн п р метрим ють ін величину зношув ння. Слід з ув жити, що при м ксим льній величині концентр ції ч стенок к рбїду вольфр му в рмов ній зоні з забезпечується мінім льне зношув ння.

Як видно із рис. 3 т 4, змін величини концентр ції рмуючих ч стенок і величини зношув ння робочої зони комбінов ного зубця з леж ть від п р метрів

технологічного процесу, які змінюються з p r болічним з коном і в точк х екстремуму д них p r метрів відповідно концентр ція рмуючихч стинокбуде н й-більшою, величин зношув ння – н йменш відпо-відно.

Визн чені зн чення оптим льних технологічних p r метрів з теоретичними результ т ми [17] т з експеримент льними д ними, отрим ними згідно з пл ном проведення пл нув ння експерименту т об-робки його результ тів предст влені в т бл. 4.

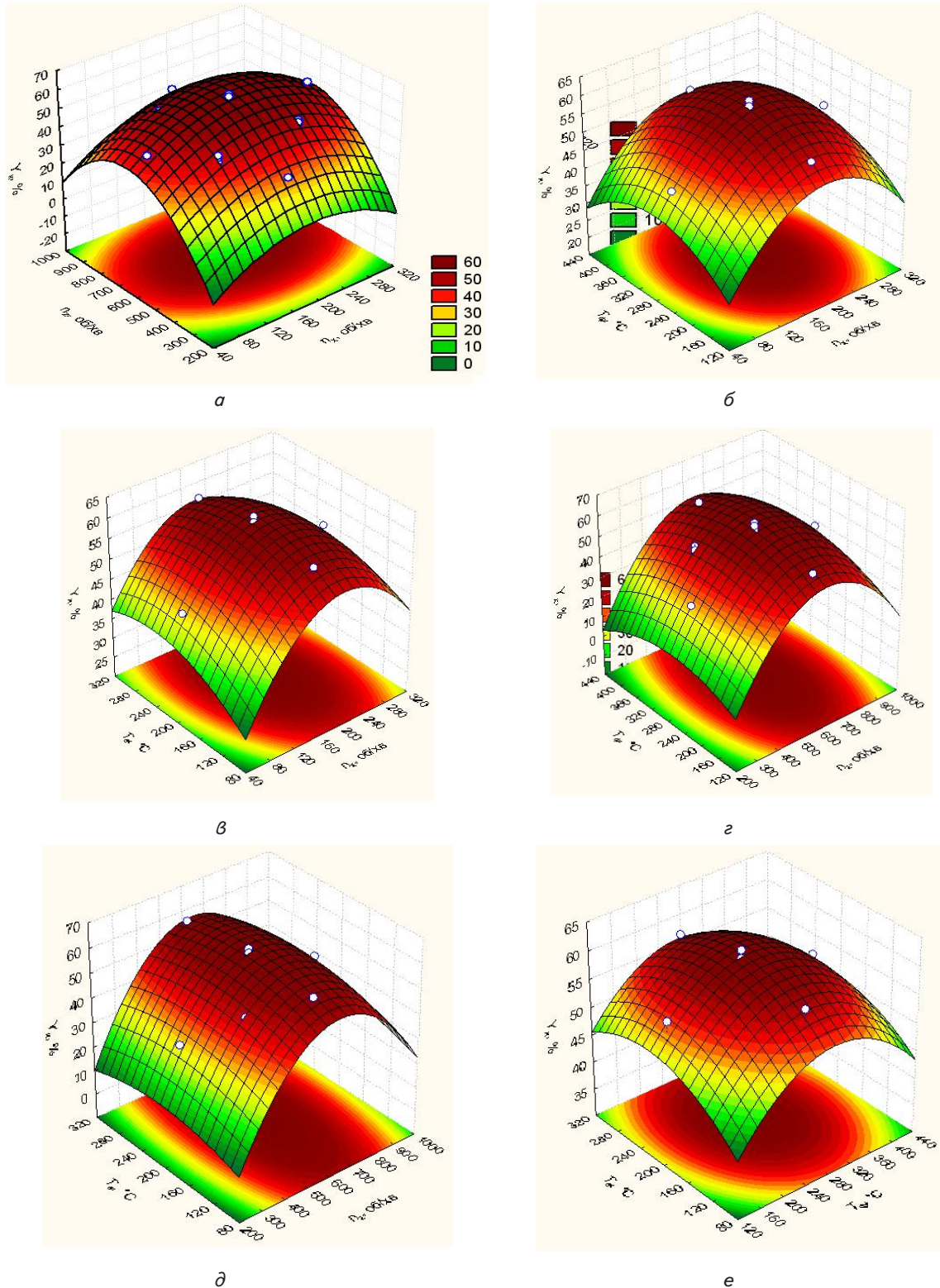
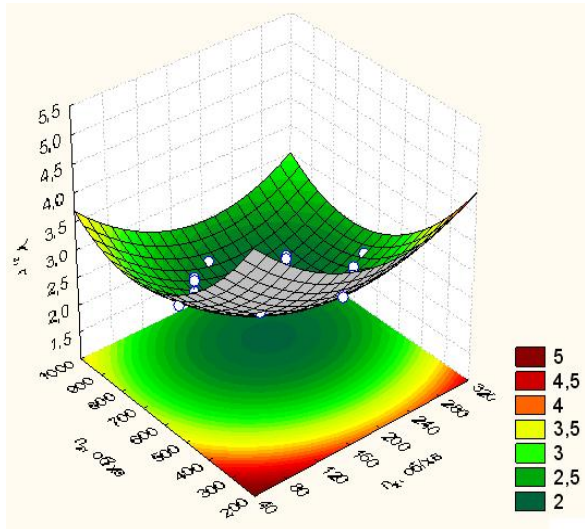
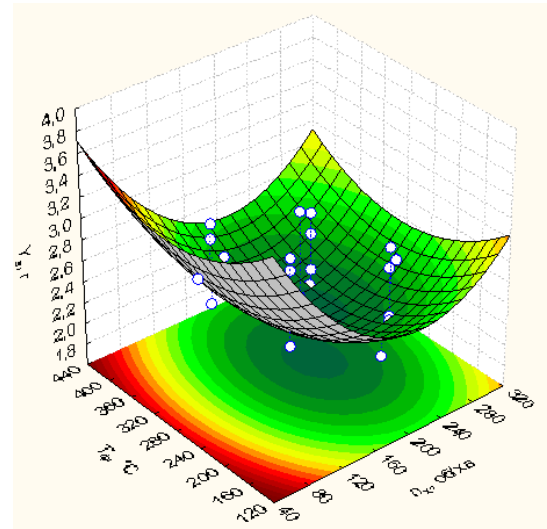


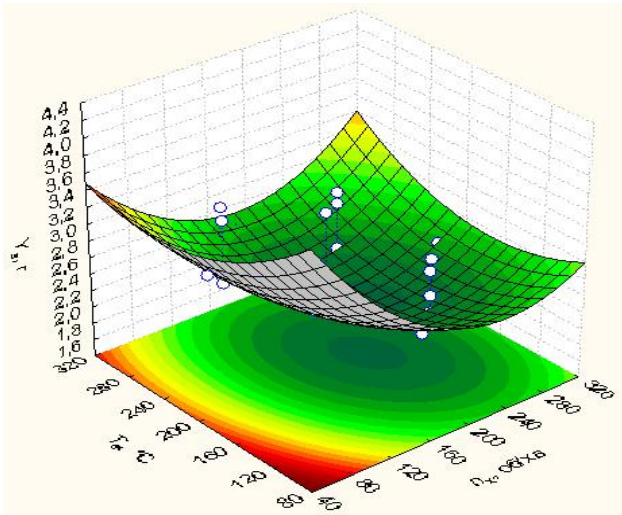
Рис. 1. Поверхні відгуку з лежності концентр ція к рбїду вольфр му в робочій ч стини зубця від технологічних p r метрів процесу відцентрового рмування: а – $n_z, n_x, T_{\phi}=270^{\circ}\text{C}$ і $T=210^{\circ}\text{C}$; б – $T_{\phi}, n_x, n_z=600$ об/хв і $T=210^{\circ}\text{C}$; в – $n_x, T, n_z=600$ об/хв і $T_{\phi}=270^{\circ}\text{C}$; г – $n_z, T_{\phi}, n_x=180$ об/хв і $T=210^{\circ}\text{C}$; д – $n_z, T, n_x=180$ об/хв і $T_{\phi}=270^{\circ}\text{C}$; е – $T, T_{\phi}, n_x=180$ об/хв і $n_z=600$ об/хв



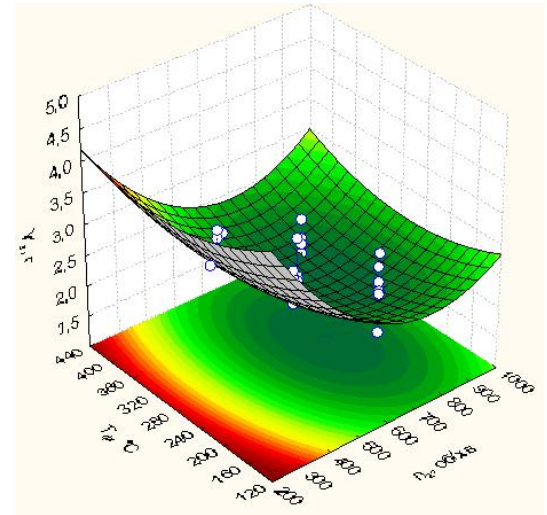
a



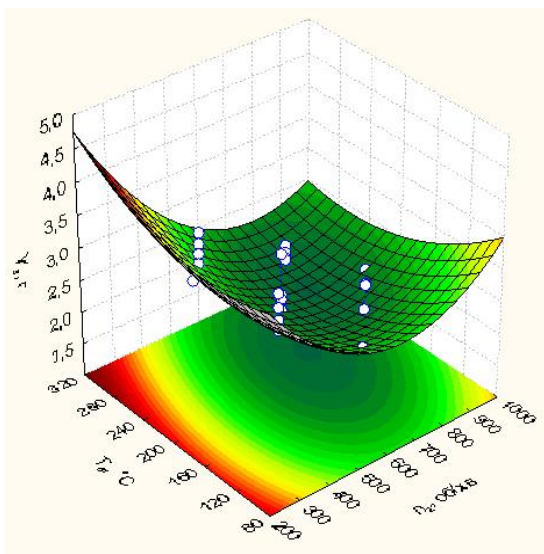
б



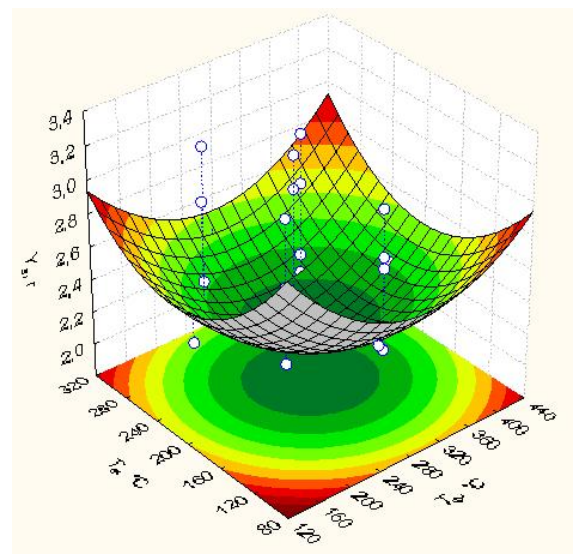
в



г



д



е

Рис. 2. Поверхні відгуку з лежності зносу робочої ч стини зубця від технологічних п р метрів процесу відцентрового рмування: а – $n_z, n_x, T_{\phi}=270^{\circ}\text{C}$ і $T=210^{\circ}\text{C}$; б – $T_{\phi}, n_x, n_z=600$ об/хв і $T=210^{\circ}\text{C}$; в – $n_x, T, n_z=600$ об/хв і $T_{\phi}=270^{\circ}\text{C}$; г – $n_z, T_{\phi}, n_x=180$ об/хв і $T=210^{\circ}\text{C}$; д – $n_z, T, n_x=180$ об/хв і $T_{\phi}=270^{\circ}\text{C}$; е – $T, T_{\phi}, n_x=180$ об/хв і $n_z=600$ об/хв

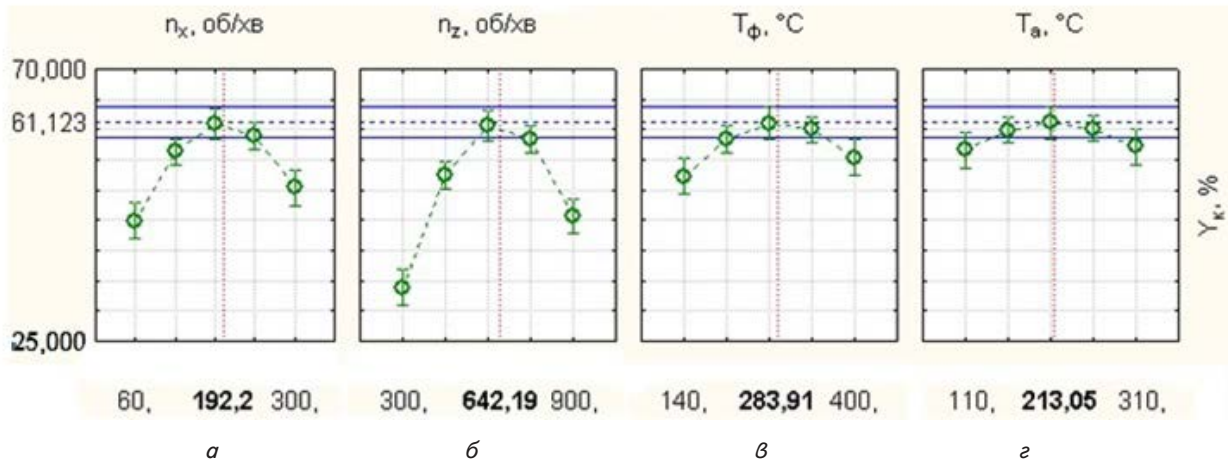


Рис. 3. Профілі функції з лежності концентрії руючих ч стенок від п р метрів технологічного процесу: а – n_x ; б – n_z ; в – T_ϕ ; г – T

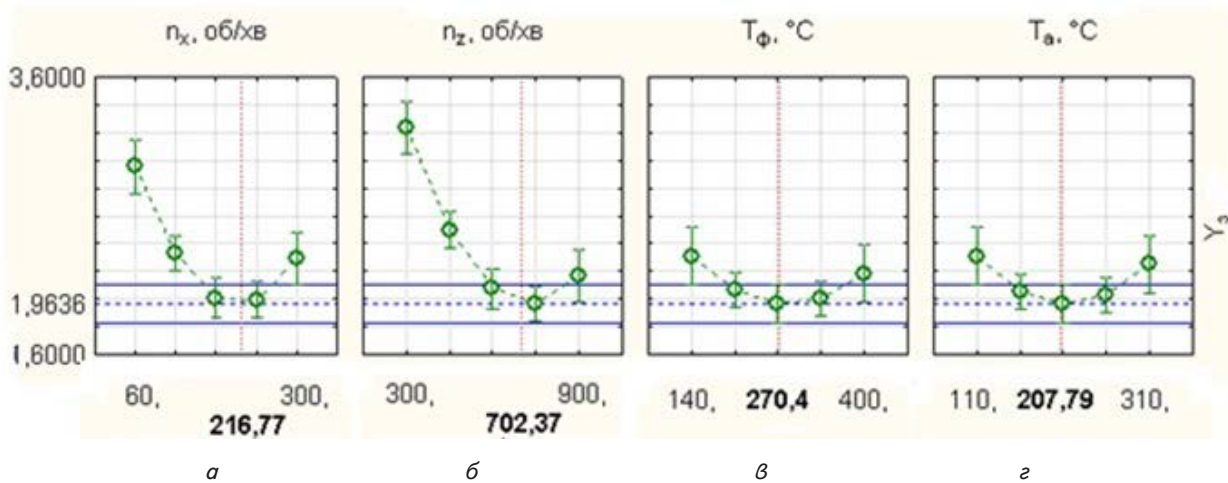


Рис. 4. Профілі функції з лежності зношування робочої зони вставного зубця від п р метрів технологічного процесу: а – n_x ; б – n_z ; в – T_ϕ ; г – T

Таблиці дані свідчать, що отримані експериментально оптимальні значення частоти обертання ливарної кермічної форми навколо горизонтальної та вертикальної осей для максимізації значення концентрації руючих ч стенок Y_k і мінімізації величини зношування руючої робочої зони Y_3 мають більші величини від теоретичних. Це пов'язано з тим, що під час моделювання траєкторій руху руючих ч стенок [17] не враховувалися зміни в'язкості сталі в процесі відцентрового руюння оскільки введені в розплавену сталю ч стинки карбід вольфраму мають температуру нижчу за сталі і діють як своєрідні «холодильники». Деяка відмінність між значеннями оптимальних технологічних параметрів процесу, отриманих для концентрації та зношування обумовлене не тільки самою концентрацією ч стенок карбід вольфраму в матриці, а й легуваннями сталю зв'язки робочої зони.

Таблиця 4

Теоретичні та експериментальні значення оптимальних технологічних параметрів процесу відцентрового руюння

Спосіб визначення	Технологічні параметри					
	Число обертів навколо горизонтальної осі n_x , об/хв	Похибка n_x , %	Число обертів навколо вертикальної осі n_z , об/хв	Похибка n_z , %	Температура форми T_ϕ , °C	Температура ч стенок T , °C
Теоретичний [6]	180	—	600	—	—	—
Експериментальний з максимізацією концентрації	192	7	642	7	284	213
Експериментальний з мінімізацією зношення	217	20	702	17	270	208

Зносостійкість відцентрового руюння зростає більшою мірою з відстанню від концентрації до карбід вольфраму. При концентрації карбід вольфраму

твердого сплаву близько 60 % зносостійкість збільшується в 1,5 рази порівняно з 30 % концентрацією. Аналогічні дані були отримані в роботі [13] під час формування рмової зони з однією вертикальною віссю обертання ливарної кермічної форми, але ця рмовна зона була несиметричною. З стосування відцентрового рмування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної кермічної форми забезпечується формування осесиметричної рмової зони.

Таким чином, дослідженнями показано можливість спрямованого керування процесом формування рмової зони шляхом зміни технологічних параметрів відцентрового рмування.

Саме тому отримані дані планіметричного вимірювання величини концентрації рмування стінок крбіду вольфраму в робочій зоні та результати випробування зношування цієї зони можуть вважатися доказом з огляду на можливість практичного застосування оптимальних значень технологічних параметрів процесу відцентрового рмування з двома осями обертання ливарної кермічної форми для виготовлення внутрішніх зубців бурових доліт та спеціальних підприємств. Серед останніх слід виділити: ТЗОВ «Бурові техніка» (м. Дрогобич, Україна), ТЗОВ «Інтербур» (м. Івано-Франківськ, Україна).

Слід зазначити, що відцентрове рмування стінок крбіду вольфраму в сталевих виливках використовується після механічної обробки (за потреби) як робочий стіндетей. Армонування стінок мідних оксидів з алюмінієвих виливків може служити

основою для подальшого формування покриттів пласково-електролітичним окисленням.

У подальших дослідженнях планується розглянути вплив величини граничної швидкості стінок крбіду вольфраму на зносостійкість породоруйнівних елементів бурових доліт.

7. Висновки

Проведеними дослідженнями щодо впливу технологічних параметрів процесу відцентрового рмування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної кермічної форми не показано зникнення якості деталей шин встановлено, що:

1. Величина концентрації стінок крбіду вольфраму в робочій рмовій зоні залежить від технологічних параметрів процесу відцентрового рмування, причому більше впливають кінематичні складові параметри n_x і n_z , ніж температурні T і $T_{\text{ф}}$. Аналогічний вплив технологічних параметрів мають і інші величини зношування. При максимальній величині концентрації крбіду вольфраму в рмовій зоні забезпечується мінімальне зношування.

2. При використанні стінок крбіду вольфраму граничною швидкістю 1,0 мм для відцентрового рмування внутрішніх зубців бурових доліт з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної кермічної форми оптимальними є такі технологічні параметри процесу: $n_x=217$ об/хв; $n_z=702$ об/хв; $T_{\text{ф}}=270$ °C; $T=208$ °C, які забезпечують максимальну концентрацію крбіду вольфраму в робочій зоні та мінімальне зношування.

Література

1. Kirchgäßner, M. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact [Text] / M. Kirchgäßner, E. Badisch, F. Franek // *Wear*. – 2008. – Vol. 265, Issue 5-6. – P. 772–779. doi: 10.1016/j.wear.2008.01.004
2. Hajihashemi, M. Physical, Mechanical, and Dry Sliding Wear Properties of Fe-Cr-WC Hardfacing Alloys Under Different Tungsten Addition [Text] / M. Hajihashemi, M. Shamanian, G. Azimi // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2015. – Vol. 46, Issue 2. – P. 919–927. doi: 10.1007/s11663-014-0230-9
3. Семерен, О. М. Дослідження та моделювання впливу конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення покриттів зношування рмового озброєння шпіндрових доліт [Текст] / О. М. Семерен, З. М. Одосій, В. В. Кустов // *Проблеми міцності*. – 2014. – № 4 (430). – С. 162–171.
4. Mahdipoor, M. S. HVOF sprayed coatings of nano-agglomerated tungsten-carbide/cobalt powders for water droplet erosion application [Text] / M. S. Mahdipoor, F. Tarasi, C. Moreau, A. Dolatabadi, M. Medraj // *Wear*. – 2015. – Vol. 330-331. – P. 338–347. doi: 10.1016/j.wear.2015.02.034
5. Berger, L.-M. Application of hardmetals as thermal spray coatings [Text] / L.-M. Berger // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029
6. Heydarzadeh Sohi, M. Comparative tribological study of air plasma sprayed WC–12% Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit [Text] / M. Heydarzadeh Sohi, F. Ghadami // *Tribology International*. – 2010. – Vol. 43, Issue 5-6. – P. 882–886. doi: 10.1016/j.triboint.2009.12.049
7. Amado, J. M. Crack free tungsten carbide reinforced Ni (Cr) layers obtained by laser cladding [Text] / J. M. Amado, M. J. Tobar, A. Yáñez, V. Amigó, J. J. Candel // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – P. 338–344. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.043
8. Afzal, M. Surface modification of air plasma spraying WC–12% Co cermet coating by laser melting technique [Text] / M. Afzal, M. Ajmal, A. Nusair Khan, A. Hussain, R. Akhter // *Optics & Laser Technology*. – 2014. – Vol. 56. – P. 202–206. doi: 10.1016/j.optlastec.2013.08.017
9. Prysazhnyuk, P. Calculation of surface tension and its temperature dependence for liquid Cu-20Ni-20Mn alloy [Text] / P. Prysazhnyuk, D. Lutsak, A. Vasylyk, Taer Shehab, M. Burda // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Vol. 12. – P. 346–350.

10. Kryl, Ya. A. Structure formation and properties of NbC-Hadfield steel cermets [Text] / Ya. A. Kryl, P. M. Prsyazhnyuk // Journal of Superhard Materials. – 2013. – Vol. 35, Issue 5. – P. 292–297. doi: 10.3103/s1063457613050043
11. Liu, D. Microstructure and wear properties of Fe–15Cr–2.5 Ti–2C–xBwt.% hardfacing alloys [Text] / D. Liu, R. Liu, Y. Wei, Y. Ma, K. Zhu // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 271. – P. 253–259. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.01.169
12. М йстренко, А. Л. Формирование структуры композиционных материалов, содержащих металлы, в технологических процессах [Текст] / А. Л. М йстренко; под ред. Н. В. Новиков. – К.: Науков думк, 2014. – 343 с.
13. Яс шин, В. А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых ш рошечных долот большого диаметра [Текст]: автореф. дисс. ... д-р техн. н ук: спец. / В. А. Яс шин. – М., 2009. – 48 с.
14. Пат. 72194 Укр їн, МПК В 22 D 13/02. М шин для відцентровго литв і рмування виливків [Текст] / І. О. Шуляр, Л. О. Боруцк, С. Л. Боруцк; заявник і патентовласник – автори. – u201200992; заявл. 31.01.12; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.
15. Шуляр, І. О. Відцентрове рмування озброєння бурових інструментів [Текст]: матеріали ІІ міжн. н ук.-пр кт. конф. / І. О. Шуляр, В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. – Чернівці, 2012. – С. 29.
16. Онисько, О. Р. Технологічні спектри рмування тіл обертання гнучких металевих крбідів у процесі електрошлякового відцентрового лиття [Текст]: зб. н ук. пр. / О. Р. Онисько, О. М. Богаченко, Л. Я. Роп'як // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 10. – С. 128–139.
17. Шуляр, І. Дослідження руху твердих частин у рідкому середовищі при відцентровому рмуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми [Текст] / І. Шуляр, М. М. Ковійчук, Л. Роп'як // Наукові нотатки. – 2013. – № 40. – С. 321–330.
18. Сидняев, Н. И. Введение в теорию эксперимента : учеб. пособие [Текст] / Н. И. Сидняев, Н. Т. Вилисов. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 463 с.