

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

*Кафедра комп'ютеризованого

машинобудівного виробництва

Івано-Франківський національний

технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 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 машинобудуванні в останні роки склалася тенденція до широкого використання зміцнюючих технологій для підвищення зносостійкості та довговічності деталей машин. Бурове і нафтогазопромислове обладнання експлуатується в складних умовах при високих тисках агресивних середовищ, які містять у своєму складі абразивні частинки гірської породи. Для деталей цього обладнання характерною є значна втрата геометричних розмірів у результаті зношування. Техніко-економічні показники роботи обладнання, машин, механізмів та інструментів залежать від зносостійкості робочих поверхонь деталей. Тому при конструюванні та розробленні технологічних процесів виготовлення деталей особливу увагу приділяють питанням підвищення їх довговічності за рахунок формування робочої зони деталей з високими показниками якості. Тому розроблення і оптимізація методів зміцнення для підвищення якості поверхонь деталей машин є актуальним і має важливе як наукове, так і практичне значення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Науково-технічний прогрес у галузі машинобудування сприяв розвитку технологій нанесення зносостійких покриттів, як містять тугоплавкі сполуки, що характеризуються високою твердістю. Останнім часом найбільш поширеними методами нанесення зносостійких шарів є електродугове наплавлення [1–3], газополумене [4, 5], плазмове наплення [6], лазерне наплавлення [7], а також комбінація цих методів [8]. При цьому як армуючі частинки в основному використовують карбїди вольфраму і хрому на нікелевій, кобальтовій, мельхіоровій [9] і залізній основі. Оскільки вказані карбїди проявляють значну хімічну активність, в деяких випадках для забезпечення отримання спеціального комплексу властивостей застосовують сполуки ніобію та титану [10, 11] на зв'язці з високолегованих сталей. Однак вказані технології дозволяють отримувати шари відносно невеликих товщин і вони мають обмежене застосування для підвищення зносостійкості деталей бурового обладнання. В роботі [12] запропоновано використовувати композиційні алма-

зовмісні матеріали, які характеризуються високою зносостійкістю, але є дорого вартісними і застосовуються у складних умовах роботи.

Серед функціонально орієнтованих технологій, які забезпечують формування зміцненої робочої зони деталей машин з високими показниками якості, слід відмітити відцентрове армування. Розрізняють відцентрове армування 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 армування застосовують армуючі частинки з питомою вагою більшою від сталевих зв'язки [13–15] або навпаки [16].

Для оцінювання впливу технологічних параметрів відцентрового армування заготовок з однією постійною (вертикальною) віссю обертання ливарної форми на стійкість до абразивного та втомного зношування використовувалась лінійна модель [13], однак за нею неможливо оптимізувати технологічний процес. Результати дослідження процесу відцентрового армування, представлені в роботі [14–16], також вказують на складні залежності руху твердих армуючих частинок у розплавленій сталі.

Проведені теоретичні дослідження процесу відцентрового армування з двома взаємноперпендикулярними осями обертання [17] свідчать про нелінійний характер впливу технологічних параметрів процесу, зокрема, частот обертання ливарної керамічної форми навколо вертикальної та горизонтальної осей на траєкторії руху частинок, для забезпечення їх попадання в робочу зону заготовки деталі. Однак у цих теоретичних дослідженнях не враховували впливу температури нагрівання ливарної керамічної форми та армуючих частинок на формування армованої зони виливок, що ускладнює оптимізацію технологічних параметрів процесу відцентрового армування.

Наведені у технічній та патентній літературі дані не дають можливість здійснювати оптимізацію технологічних параметрів процесу відцентрового армування виливок, що стримує широке застосування технології відцентрового армування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень впливу технологічних параметрів процесу відцентрового армування з урахуванням чисел обертів навколо горизонтальної та вертикальної осей і температур нагрівання ливарної керамічної форми та армуючих частинок.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи є побудова математичної моделі процесу відцентрового армування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми і встановлення оптимальних значень технологічних параметрів для забезпечення отримання максимальної концентрації частинок карбіду вольфраму в робочій зоні вставних зубців бурових доліт та їх мінімальне зношування.

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

вого армування на величину концентрації частинок карбіду вольфраму в робочій зоні та її зносостійкість;

– визначити оптимальні значення технологічних параметрів процесу відцентрового армування, які забезпечують максимальну величину концентрації частинок карбіду вольфраму в робочій зоні та мінімальне її 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 армування на експлуатаційні властивості вставних 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, яка була модернізована і споряджена автоматизованою системою керування [15]. Матеріалом матриці слугувала сталь 18ХН2МФЛ. Температура розплаву матричної сталі в процесі відцентрового армування становила 1600–1630 °С. Як армуючі частинки застосовували карбід вольфраму з питомою густиною $\rho=15,7$ г/см³. Грануляція армуючих частинок складала 1,0 мм. Ливарні керамічні форми виготовляли за витоплюваними моделями за стандартною технологією.

4.2. Методики досліджень

Концентрацію частинок карбіду вольфраму (Y_k , %) в робочій армованій зоні зразків визначали планіметричним методом на металографічних мікрошліфах. Випробовування на зношування (Y_3 , г) проводили на установці за методикою, описаною в роботі [12].

4.3. Методика планування експериментальних досліджень

Як план проведення експерименту для отримання регресійних моделей (тобто залежностей концентрації частинок карбіду вольфраму та зносостійкості від частоти обертання ливарної керамічної форми навколо горизонтальної n_x і вертикальної осей n_z) температури нагрівання ливарної керамічної форми T_ϕ і армуючих частинок карбіду вольфраму X_1 для оптимізації технологічних параметрів процесу відцентрового армування був вибраний ротатабельний 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 такому виді експерименту досліди проводять за матрицею, яка містить три групи дослідів, які розміщені симетрично і на однаковій віддалі від центра експерименту:

- 1) ядро має повнофакторний експеримент 2⁴;
- 2) досліди, що проводяться у «зіркових» точках факторного простору;
- 3) досліди у центрі експерименту.

Загальна кількість дослідів у ротатабельному центральному композиційному експерименті залежить

від кількості факторів. Вибір числа 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 матриці плану експерименту, тобто від способу вибору величини зіркового плеча α і числа дослідів в центрі експерименту, розрізняють ротатабельний і ортогональний план. Найбільшого поширення в практиці досліджень набув ротатабельний план експерименту згідно з яким матриці РЦКП повинні мати властивість ротатабельності, тобто на основі отриманої математичної моделі значення параметра оптимізації у різних точках факторного простору, розміщених на однаковій віддалі від центра експерименту, повинні мати мінімальні та рівні дисперсії. Число дослідів в центрі експерименту повинні забезпечувати дисперсію передбачуваного значення Y всередині області експерименту постійну і незалежну від віддалі до центра експерименту.

РЦКЕ проводять на п'яти кодованих рівнях $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$, тому інтервал зміни факторів повинен бути таким, щоб діапазон зміни його охоплював стаціонарну область факторного простору (табл. 1).

Таблиця 1

План-матриця проведення технологічних експериментів типу РЦКП

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

Оскільки технологічні параметри процесу відцентрового армування (незалежні фактори n_x, n_y, T_ϕ, T_a)

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

Залежність між кодованими x_i та натуральними X_i значеннями змінних для i -го фактору визначали за формулою [8]

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

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

Нульовий рівень натурального значення фактора розраховували за формулою [8]

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

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

Інтервал варіювання i -го фактора визначали за формулою [8]

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

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

X_1 – кількість обертів ливарної керамічної форми навколо горизонтальної осі;

X_2 – кількість обертів ливарної керамічної форми навколо вертикальної осі;

X_3 – температура нагрівання керамічної ливарної форми;

X_4 – температура нагрівання армуючих частинок карбиду вольфраму.

Границі варіювання технологічних параметрів процесу відцентрового армування вибирали з таких міркувань:

– частоти обертання ливарної форми навколо горизонтальної та вертикальної осей вибирали за результатами комп'ютерного моделювання процесу відцентрового армування [17] та з урахуванням рекомендацій [13, 15, 16];

– температуру нагрівання ливарної керамічної форми вибирали із умови забезпечення раціонального легування металозв'язки в армованій зоні деталі. За результатами досліджень [13] вона складає 100–400 °С. Підвищення температури вище показника 350–400 °С призводить до підвищення інтенсивності розчинення армуючих частинок карбиду вольфраму в розтопленій сталі;

– температуру нагрівання армуючих частинок карбиду вольфраму вибирали за рекомендаціями [13] з умови зменшення ефекту «холодильників» при потрапленні частинки в розплавлений метал (нижнє значення 100 °С), запобігання інтенсивному розчиненню у розплавленій сталі (верхнє значення 300 °С).

Досліди проводили за фіксованих розмірів армуючих частинок, оскільки траєкторії руху армуючих частинок залежать від їх геометричних розмірів (ваги) [17], тому як фактор в регресійну модель не вводили діаметр армуючої частинки, а приймали за результатами наших методичних дослідів – 1 мм.

РЦКЕ провели на п'яти рівнях варіювання факторів. У зіркових точках із урахуванням для чотирьох факторів величини плеча експерименту $\alpha = 2$ та в центрі експерименту.

Вибрані фактори відповідають всім вимогам, які висуваються до них. Точність підтримання технологічних параметрів процесу відцентрового армування складала 3–5 %. Інтервали варіювання наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Кодові та натуральні значення факторів і рівні їх варіювання

Рівні факторів	Кодові значення				Натуральні значення			
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	n _x , об/хв	n _z , об/хв	T _ф , °C	T _а , °C
Основний рівень	0	0	0	0	180	600	270	210
Інтервал варіювання	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 факторів (перепади напруги живлення обладнання, температури води для охолодження індуктора та температури в лабораторії) на значення параметрів оптимізації, проводили рандомізацію план-матриці методом випадкового балансу, реалізованим способом випадкових чисел.

Для опису технологічного процесу відцентрового армування (чотири фактори) 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 $b_0, b_1-b_4, b_{12}-b_{34}, b_{11}-b_{44}$ – коефіцієнти, які характеризують вільний член рівняння, лінійні ефекти, ефекти взаємодії та квадратичні ефекти відповідно; x_1, x_2, x_3, x_4 – контрольовані фактори (технологічні параметри процесу відцентрового армування).

Загальне число коефіцієнтів регресії в поліномі (4) визначали із виразу

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

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

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

лінома (4) та їх дисперсії розраховували за відомими формулами.

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стюдента. Для цього розрахункове значення зрівняли з табличним або значення коефіцієнтів регресії з абсолютною його довірчою помилкою. Табличне значення критерію Стюдента визначають при $p_d = 0,95$ і числі степенів вільності дисперсії вихідного параметра, за якою визначалась дисперсія коефіцієнта регресії. Гіпотезу про адекватність моделі другого порядку (тобто відповідність математичної моделі реальному технологічному процесу відцентрового армування) перевіряли за критерієм Фішера.

Досліди (однакове число) проводили у всіх трьох групах дослідів матриці планування РЦКЕ, а розрахункове значення критерію Фішера визначали за відомою методикою. Гіпотеза про адекватність отриманої моделі другого порядку не відкидається, якщо розрахункове $F_R < F_T$, де F_T – табличне значення.

За результатами розрахунків, які проводилися на ПК з використанням прикладної статистичної програми (STATISTIKA), будували поверхні відгуку параметра оптимізації та їх двомірні перерізи, а також визначали оптимальні значення технологічних параметрів процесу відцентрового армування.

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 армування [17] і встановлення закономірностей зміни концентрації частинок карбіду вольфраму u_k в робочій зоні комбінованого зубця та його зносостійкості u_3 , в залежності від кількості обертів ливарної керамічної форми навколо горизонтальної n_x та вертикальної n_z осей, температури ливарної керамічної форми T_ϕ і температури армуючих частинок T_a виготовили лабораторні експериментальні взірці вставних зубців бурових дослідів, отриманих згідно з розробленою технологією відцентрового армування та дослідили кількість карбіду вольфраму в робочій армованій зоні ($Y_k, \%$) планіметричним методом, а також провели випробування на зношування (Y_3, r) робочої армованої зони зубців.

Функції відгуку як параметр оптимізації (концентрацію u_k та зносостійкість u_3) будували на основі результатів експериментальних досліджень у вигляді полінома другого порядку (4).

Визначили невідомі коефіцієнти полінома у кодованому вигляді. Після ранжування і визначення значущості при рівні 0,05 коефіцієнти зведені до табл. 3.

Остаточні рівняння регресії, які відображають залежність концентрації армуючих частинок карбіду вольфраму в робочій армованій зоні комбінованого зубця $u_{k1(x1x2x3x4)} = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a)$, а також його зношування $u_{31(x1x2x3x4)} = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a)$ залежно від зміни частоти обертання ливарної керамічної форми навколо горизонтальної n_x і вертикальної n_z осей, а також температури нагрівання керамічної ливарної форми T_ϕ і частинок карбіду вольфраму T_a за результатами проведених РЦКП у кодованих величинах набувають вигляду:

– для концентрації

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

– для зношування

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

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

– для зношування

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

Таблиця 3

Коефіцієнти апроксимуючого полінома другого порядку

Коефіцієнт \ Параметр	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₂₄	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃	b ₄₄
Концентрація, Y _K	60,5	1,367	2,867	–	–	–3,34	–5,24	–1,802	–1,065
Зношування, Y ₃	2,12	–0,168	–0,275	–0,046	–0,067	0,154	0,156	0,070	0,079

Відтак визначали основний рівень та інтервал його варіювання для кожного фактора за формулою (2) і (3) відповідно:

– для частоти обертання ливарної керамічної форми навколо горизонтальної осі n_x

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

– для частоти обертання ливарної керамічної форми навколо вертикальної осі n_z

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

– для температури нагрівання керамічної ливарної форми T_φ

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

– для температури підігрівання армуючих частинок карбіду вольфраму T_a

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

Кодовані значення кожного фактору набували вигляду відповідно до формули (1)

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

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

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

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

Після підстановки формул (7)–(10), перетворень і спрощень виразів (5) і (6) рівняння регресії для Y_K і Y₃ у натуральних величинах набувають остаточного вигляду:

– для концентрації

Знайдені рівняння регресії як в кодованих, так і в натуральних величинах можуть використовуватися для визначення концентрації армуючих частинок Y_{Ki} і зношування зубця Y_{3i} залежно від зміни частоти обертання ливарної керамічної форми навколо горизонтальної n_x, вертикальної n_z осей, температури нагрівання ливарної керамічної форми T_φ та армуючих частинок карбіду вольфраму T_a, які перебувають в межах 120 ≤ n_x ≤ 240 об/хв, 450 ≤ n_z ≤ 750 об/хв, 205 ≤ T_φ ≤ 335 °C, 160 ≤ T_a ≤ 260 °C відповідно.

Для визначення впливу параметрів технологічного процесу (змінних факторів) на параметри оптимізації будували поверхні відгуку параметрів оптимізації та їх двомірні перерізи залежно від двох змінних чинників x_{i(1,2)} при постійних основних рівнях інших двох чинників x_{i(3,4)}.

Після опрацювання експериментальних даних і перевірки значущості коефіцієнтів регресії та адекватності вибраної математичної моделі другого порядку даному технологічному процесу відцентрового армування отримали проміжні рівняння регресії концентрації армуючих частинок Y_K і величини зношування Y₃ робочої зони комбінованого зубця в залежності від впливу двох змінних факторів.

Відповідно за рівняннями регресії побудовано поверхні відгуку та двомірні перерізи цих поверхонь концентрації армуючих частинок в робочій армованій зоні та величини зношування робочої зони зубця залежно від двох чинників, коли інші два залишаються сталими, рівними значенням на 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

Аналіз результатів, одержаних за рівняннями поверхні відгуку, свідчать, що величина концентрації частинок карбіду вольфраму залежить від параметрів технологічного процесу, причому більше впливають кінематичні складові параметрів n_x і n_z, ніж температурні T_φ і T_a (рис. 1, 2). Аналогічний вплив технологічні параметри мають і на величину зношування. Слід зауважити, що при максимальній величині концентрації частинок карбіду вольфраму в армованій зоні забезпечується мінімальне зношування.

Як видно із рис. 3 та 4, зміна величини концентрації армуючих частинок і величини зношування робочої зони комбінованого зубця залежать від параметрів

технологічного процесу, які змінюються за параболічним законом і в точках екстремуму даних параметрів відповідно концентрація армуючих частинок буде найбільшою, а величина зношування – найменша відповідно.

Визначені значення оптимальних технологічних параметрів за теоретичними результатами [17] та за експериментальними даними, отриманими згідно з планом проведення планування експерименту та обробки його результатів представлені в табл. 4.

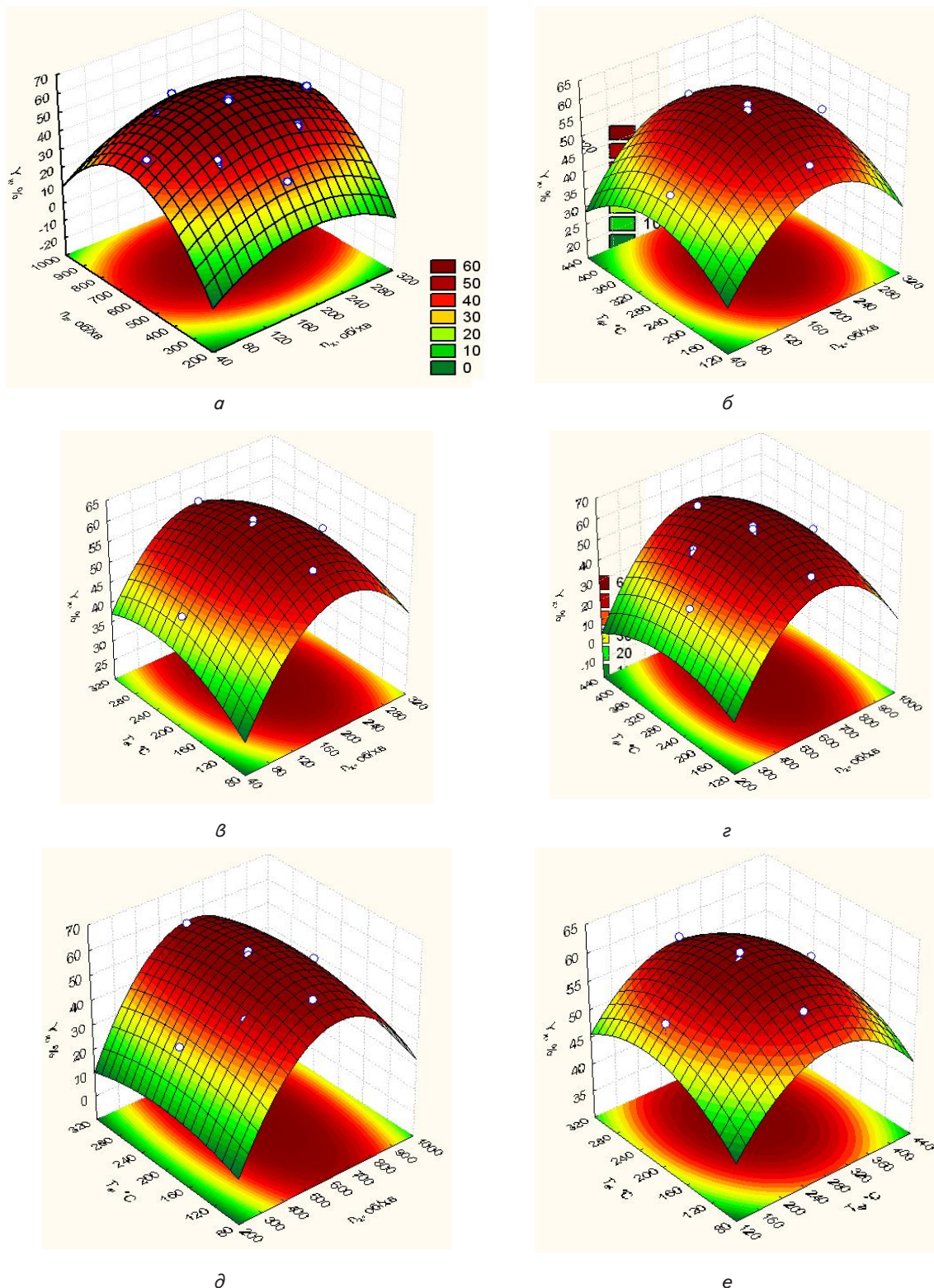
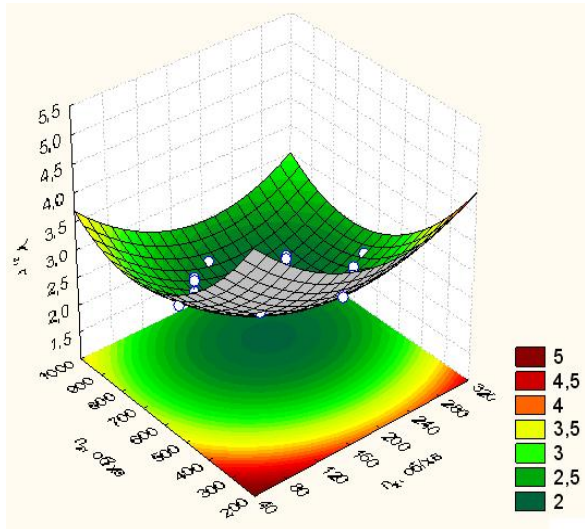
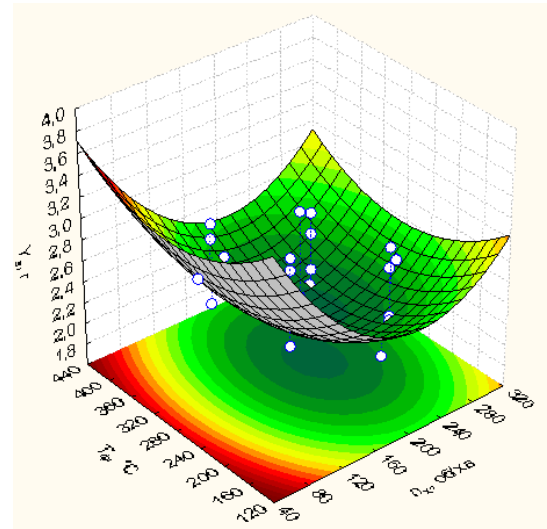


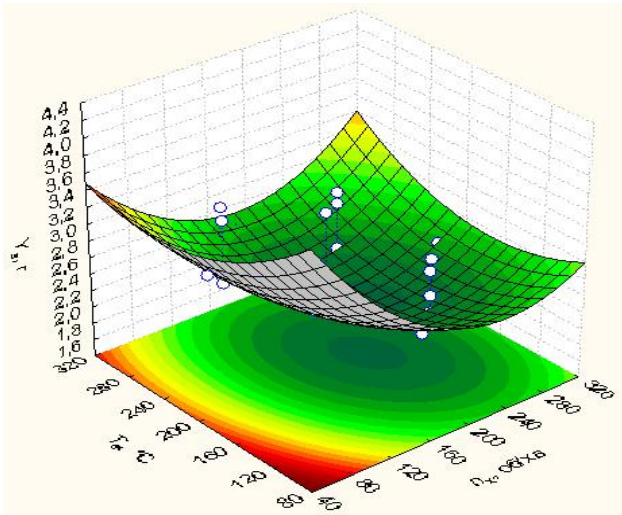
Рис. 1. Поверхні відгуку залежності концентрації карбіду вольфраму в робочій частині зубця від технологічних параметрів процесу відцентрового армування: а – $n_z, n_x, T_{\phi}=270\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $T_a=210\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $T_{\phi}, n_x, n_z=600\text{ об/хв}$ і $T_a=210\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – $n_x, T_a, n_z=600\text{ об/хв}$ і $T_{\phi}=270\text{ }^{\circ}\text{C}$; г – $n_z, T_{\phi}, n_x=180\text{ об/хв}$ і $T_a=210\text{ }^{\circ}\text{C}$; д – $n_z, T_a, n_x=180\text{ об/хв}$ і $T_{\phi}=270\text{ }^{\circ}\text{C}$; е – $T_a, T_{\phi}, n_x=180\text{ об/хв}$ і $n_z=600\text{ об/хв}$



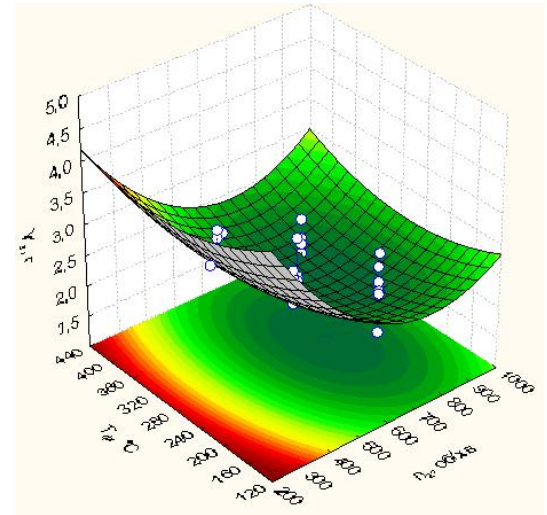
а



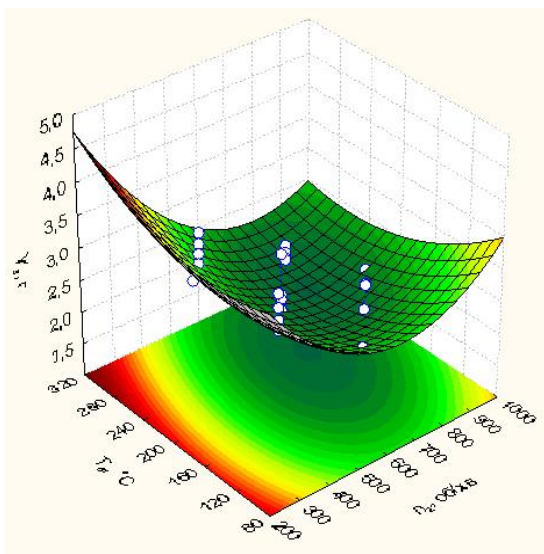
б



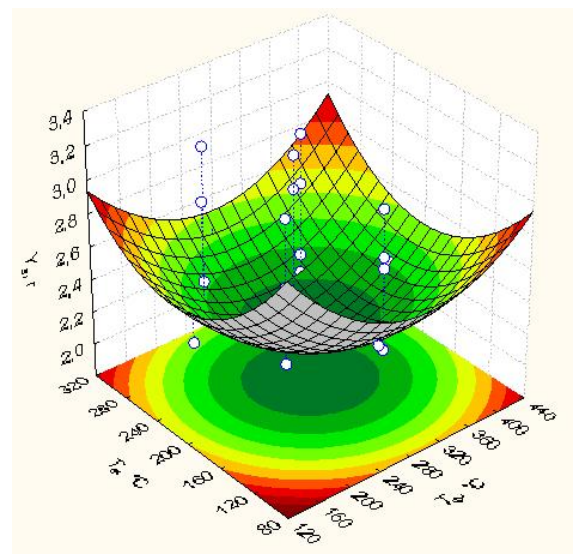
в



г



д



е

Рис. 2. Поверхні відгуку залежності зносу робочої частини зубця від технологічних параметрів процесу відцентрового армування: а – $n_z, n_x, T_\phi=270^\circ\text{C}$ і $T_a=210^\circ\text{C}$; б – $T_\phi, n_x, n_z=600$ об/хв і $T_a=210^\circ\text{C}$; в – $n_x, T_a, n_z=600$ об/хв і $T_\phi=270^\circ\text{C}$; г – $n_z, T_\phi, n_x=180$ об/хв і $T_a=210^\circ\text{C}$; д – $n_z, T_a, n_x=180$ об/хв і $T_\phi=270^\circ\text{C}$; е – $T_a, T_\phi, n_x=180$ об/хв і $n_z=600$ об/хв

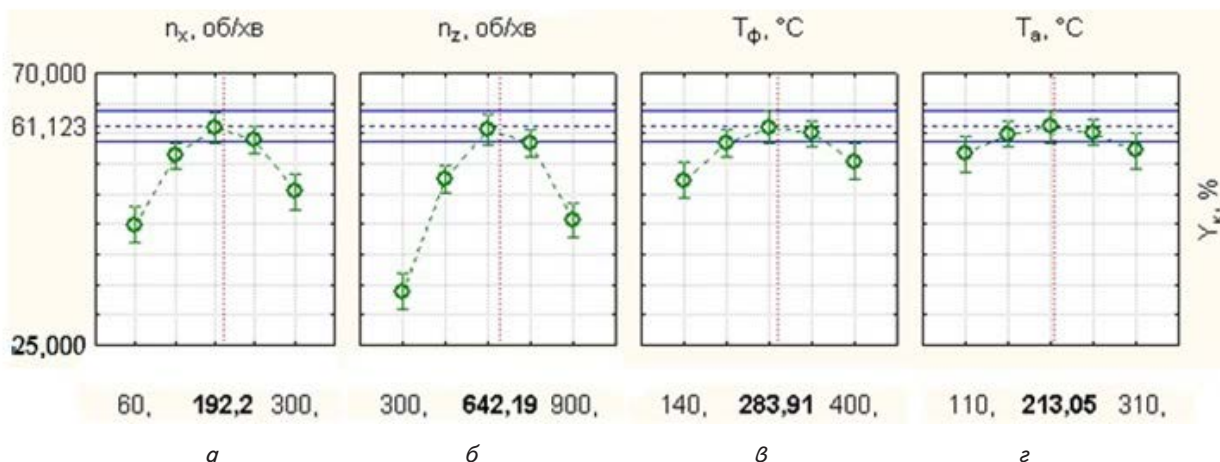


Рис. 3. Профілі функції залежності концентрації армуючих частинок від параметрів технологічного процесу: а – n_x ; б – n_z ; в – T_ϕ ; г – T_a

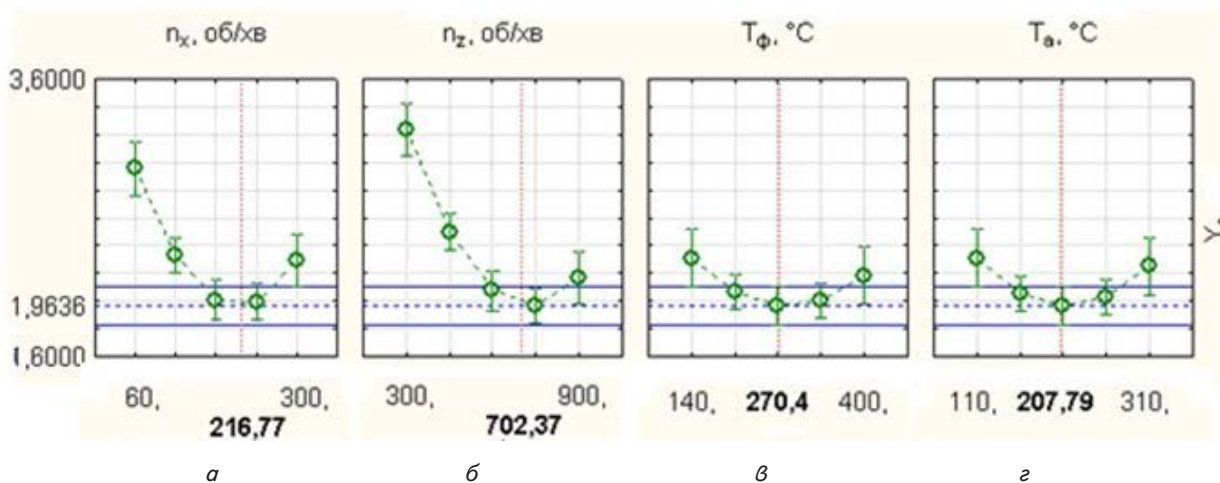


Рис. 4. Профілі функції залежності зношування робочої зони вставного зубця від параметрів технологічного процесу: а – n_x ; б – n_z ; в – T_ϕ ; г – T_a

Табличні дані свідчать, що отримані експериментально оптимальні значення частот обертання ливарної керамічної форми навколо горизонтальної та вертикальної осей для максимального значення концентрації армуючих частинок Y_k і мінімальної величини зношування армованої робочої зони Y_3 мають більші величини від теоретичних. Це пов'язано з тим, що під час математичного моделювання траєкторій руху армуючих частинок [17] не враховувалася зміна в'язкості сталі в процесі відцентрового армування оскільки введені в розплавлену сталь частинки карбіду вольфраму мають температуру нижчу за сталь і діють як своєрідні «холодильники». Деяка відмінність між значеннями оптимальних технологічних параметрів процесу, отриманих для концентрації та зношування обумовлена не тільки самою концентрацією частинок карбіду вольфраму в матриці, а й легуванням сталевий зв'язки робочої зони.

Таблиця 4

Теоретичні та експериментальні значення оптимальних технологічних параметрів процесу відцентрового армування

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 частинок T_a , °C
Теоретичний [6]	180	—	600	—	—	—
Експериментальний за максимальною концентрацією	192	7	642	7	284	213
Експериментальний за мінімальним зношенням	217	20	702	17	270	208

Зносостійкість відцентрово армованих зразків більшою мірою залежить від концентрації карбіду вольфраму. При концентрації карбіду вольфраму

твердого сплаву близько 60 % зносостійкість збільшується в 1,5 рази порівняно з 30 % концентрацією. Аналогічні дані були тримані автором в роботі [13] під час формування армованої зони з однією вертикальною віссю обертання ливарної керамічної форми, але ця армована зона була несиметричною. Застосування відцентрового армування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми забезпечує формування осесиметричної армованої зони.

Таким чином, дослідженнями показано можливість спрямованого керування процесом формування робочої армованої зони шляхом зміни технологічних параметрів відцентрового армування.

Саме тому отримані дані планіметричного визначення величини концентрації армуючі частинок карбіду вольфраму в робочій зоні та результати випробування на зношування цієї зони можуть вважатися за доказову базу можливості практичного застосування оптимальних значень технологічних параметрів процесу відцентрового армування з двома осями обертання ливарної керамічної форми для виготовлення вставних зубців бурових доліт на спеціалізованих підприємствах. Серед останніх слід виділити: ТзОВ «Бурова техніка» (м. Дрогобич, Україна), ТзОВ «Інтербур» (м. Івано-Франківськ, Україна).

Слід зазначити, що відцентрово армована частинка карбіду вольфраму зона в сталевих виливках використовується після механічної обробки (за потреби) як робоча частина деталей. Армована частинками оксидів зона в алюмінієвих виливках може служити

основою для подальшого формування покриттів плазмово-електролітичним окисненням.

У подальших дослідженнях планується розглянути вплив величини грануляції частинок карбіду вольфраму на зносостійкість породоруйнівних елементів бурових доліт.

7. Висновки

Проведеними дослідженнями щодо впливу технологічних параметрів процесу відцентрового армування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми на показники якості деталей машин встановлено, що:

1. Величина концентрації частинок карбіду вольфраму в робочій армованій зоні залежить від технологічних параметрів процесу відцентрового армування, причому більше впливають кінематичні складові параметрів n_x і n_z , ніж температурні T_a і T_f . Аналогічний вплив технологічні параметри мають і на величину зношування. При максимальній величині концентрації карбіду вольфраму в армованій зоні забезпечується мінімальне її зношування.

2. При використанні частинок карбіду вольфраму грануляцією 1,0 мм для відцентрового армування вставних зубців бурових доліт з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми оптимальними є такі технологічні параметри процесу: $n_x=217$ об/хв; $n_z=702$ об/хв; $T_f=270$ °C; $T_a=208$ °C, які забезпечують максимальну концентрацію карбіду вольфраму в робочій зоні та мінімальне її зношування.

Література

1. Kirchgaßner, M. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact [Text] / M. Kirchgaßner, E. Badisch, F. Franek // *Wear*. – 2008. – Vol. 265, Issue 5-6. – P. 772–779. doi: 10.1016/j.wear.2008.01.004
2. Hajhashemi, M. Physical, Mechanical, and Dry Sliding Wear Properties of Fe-Cr-WC Hardfacing Alloys Under Different Tungsten Addition [Text] / M. Hajhashemi, 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 на показники зношування армованого озброєння шарошkových 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. Prysyzhnyuk, P. Calculation of surface tension and its temperature dependence for liquid Cu-20Ni-20Mn alloy [Text] / P. Prysyzhnyuk, 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. Майстренко, А. Л. Формирование структуры композиционных алмазосодержащих материалов технологических процессах [Текст] / А. Л. Майстренко; под ред. Н. В. Новикова. – К.: Наукова думка, 2014. – 343 с.
13. Ясашин, В. А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: спец. / В. А. Ясашин. – М., 2009. – 48 с.
14. Пат. 72194 Україна, МПК В 22 D 13/02. Машина для відцентровго литва і армування виливків [Текст] / І. О. Шуляр, Л. О. Борушак, С. Л. Борушак; заявник і патентовласник – автори. – u201200992; заявл. 31.01.12; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15. – 3 с.: ил.
15. Шуляр, І. О. Відцентрове армування озброєння бурових інструментів [Текст]: матеріали II міжн. наук.-практ. конф. / І. О. Шуляр, В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. – Чернігів, 2012. – С. 29.
16. Онисько, О. Р. Технологічні аспекти армування тіл обертання гранулами легких карбідів у процесі електрошлакового відцентрового лиття [Текст]: зб. наук. 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 частинок у рідкому сплаві при відцентровму армуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми [Текст] / І. Шуляр, М. Маковійчук, Л. Роп'як // Наукові нотатки. – 2013. – № 40. – С. 321–330.
18. Сидняев, Н. И. Введение в теорию эксперимента : уч. пособие [Текст] / Н. И. Сидняев, Н. Т. Вилисова. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 463 с.