

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВІДЦЕНТРОВОГО АРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ З ДВОМА ВЗАЄМНОПЕРПЕНДИКУЛЯРНИМИ ОСЯМИ ОБЕРТАННЯ ЛИВАРНОЇ ФОРМИ

Л.Я. Роп'як, І.О. Шуляр, М.С. Воробійов, О.М. Богаченко, Є.В. Остапович

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727184,
e-mail: t n g m @ n i n g . e d u . u a

Подано результати дослідження технологічного процесу відцентрового армування робочої зони сталевих деталей типу тіл обертання частинками карбіду вольфраму з питомою густиною, більшою від такої у сталі методом математичного планування експерименту. Отримано регресійні моделі другого порядку залежності концентрації частинок карбіду вольфраму та зносостійкості зразків від технологічних параметрів процесу відцентрового армування з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної форми: числа обертів ливарної форми навколо горизонтальної та вертикальної осей, температури нагрівання керамічної форми і армуючих частинок. Визначено оптимальні значення технологічних параметрів і встановлено, що на величину концентрації частинок карбіду вольфраму та зносостійкість зразків більшою мірою впливають кінематичні параметри процесу відцентрового армування, ніж температурні.

Ключові слова: технологічний процес, відцентрове армування, технологічні параметри, частинки карбіду вольфраму, сталева матриця, концентрація, зносостійкість

Приведены результаты исследования технологического процесса центробежного армирования рабочей зоны стальных деталей типа тел вращения частицами карбида вольфрама, имеющего удельную плотность, большую, чем такую у стали, методом математического планирования эксперимента. Получены регрессионные модели второго порядка зависимости концентрации частиц карбида вольфрама и износостойкости образцов от технологических параметров процесса центробежного армирования с двумя взаимноперпендикулярными осями вращения литейной формы: числа оборотов литейной формы вокруг горизонтальной и вертикальной осей, температуры нагрева керамической формы и армирующих частиц. Определены оптимальные значения технологических параметров и установлено, что на величину концентрации частиц карбида вольфрама и износостойкость образцов в большей степени влияют кинематические параметры процесса центробежного армирования, чем температурные.

Ключевые слова: технологический процесс, центробежное армирование, технологические параметры, частицы карбида вольфрама, стальная матрица, концентрация, износостойкость

This paper presents the research results of technological parameters of centrifugal reinforcement of steel parts working area such as revolution bodies by tungsten carbide particles, specific density of which is greater than that of the steel, by mathematical planning of experiment. The authors have received polynomial regression models of the dependence of tungsten carbide particles concentrations and part blanks durability on the technological parameters of centrifugal reinforcement with two mutually perpendicular axes of the mold revolution: mold rpm around horizontal and vertical axes, the heating temperature of a ceramic form and reinforcing particles. The optimum values of technological parameters are determined and it is found that the magnitude of the concentration of tungsten carbide particles and part blanks wear resistance are influenced rather by kinematic parameters of the centrifugal reinforcement than the temperature.

Keywords: technological process, centrifugal reinforcement, technological parameters, tungsten carbide particles, steel matrix, concentration, wear resistance

Вступ. Техніко-економічні показники роботи обладнання, машин, механізмів та інструментів залежать від зносостійкості робочих поверхонь деталей. Тому при конструюванні та виготовленні деталей особливу увагу приділяють питанням підвищення їх довговічності. Розвиток науково-технічного прогресу в галузі створення сучасних функціонально орієнтованих технологій неможливий без оптимізації технологічних параметрів процесу виготовлення деталей машин.

Останні дослідження і публікації. 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) [1], із змінною віссю (похилою) [2] та з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної форми [3].

Для оцінки впливу технологічних параметрів відцентрового армування заготовок з однією постійною (вертикальною) віссю обертання ливарної форми на стійкість до абразивного та втомного зношування використовувалась лінійна модель [1, 4], однак за нею неможливо оптимізувати технологічний процес. Результати дослідження процесу відцентрового армування, представлені в роботі [5], також вказують на складні залежності руху твердих армуючих частинок у розплавленій сталі.

Проведені нами теоретичні дослідження процесу відцентрового армування з двома взаємноперпендикулярними осями обертання [6] 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 взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми.

Мета досліджень. Метою даної роботи є побудова математичної моделі процесу відцентрового армування, оцінювання впливу технологічних параметрів (кінематичних і температурних) на концентрацію частинок карбіду вольфраму в робочій зоні породоруйнівних елементів та їх зносостійкість для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу виготовлення заготовок деталей з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми.

Методика досліджень. Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу відцентрового армування на експлуатаційні властивості вставних зубців бурових доліт використовували розроблену на кафедрі технології нафтогазового машинобудування ІФНТУНГ установку з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної форми [3], яка була нами модернізована і споряджена автоматизованою системою керування. Матеріалом матриці слугувала сталь 18ХН2МФЛ. Як армуючі частинки застосовували карбід вольфраму з питомою густиною $\rho = 15,7 \text{ г/см}^3$. Грануляція армуючих частинок складала 1,0 мм. Ливарні керамічні форми виготовляли за витоплюваними моделями за стандартною технологією.

Концентрацію частинок карбіду вольфраму (V_k , %) в робочій армованій зоні зразків визначали планіметричним методом на металографічних шліфах. Випробовування на зношування (V_z , г) проводили на установці за методикою, описаною в роботі [7].

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 T_a для оптимізації технологічних параметрів процесу відцентрового армування нами був вибраний ротатабельний центральний композиційний план (РЦКП) [8]:

$$Y_K = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a); Y_3 = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a).$$

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 2^4 ;
- 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 [8]:

- 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 [8] згідно з яким матриці РЦКП повинні мати властивості 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 у центрі експерименту повинне забезпечувати дисперсію передбачуваного значення Y всередині області експерименту – постійну і незалежну від віддалі до центра експерименту.

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

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]

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1)$$

де X_i – натуральне значення фактора на нижньому (верхньому) рівні;

X_{i0} – натуральне значення фактора на нульовому рівні;

Таблиця 1 – План-матриця проведення експериментів типу РЦКП

| Номер досліджу | 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} | $Y_{26с}$ |

ΔX_i – інтервал варіювання натуральних значень фактора відносно нульового рівня.

Нульовий рівень натурального значення фактора розраховували за формулою [8]

$$X_{i0} = \frac{X_{maxi} + X_{mini}}{2}, \quad (2)$$

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]

$$\Delta X_i = \frac{X_{maxi} - X_{mini}}{2}. \quad (3)$$

Основними параметрами технологічного процесу відцентрового армування, що застосовувались 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 карбіду 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 [6] та з урахуванням рекомендацій [1, 5];

– температуру нагрівання ливарної керамічної форми вибирали із умови забезпечення раціонального легування металозв'язки в армованій зоні деталі. За результатами досліджень [1, 4] вона складає 100-400 °С. Підвищення температури вище показника 350-400 °С призводить до підвищення інтенсивності розчинення армуючих частинок карбіду вольфраму в розплавленій сталі;

– температуру нагрівання армуючих частинок карбіду вольфраму вибирали за рекомендаціями [1] з умови: зменшення ефекту «холодильників» при потраплянні частинок в розпла-

Таблиця 2 – Кодування факторів та 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_ϕ , °C | T_a , °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 |

влений метал (нижнє значення 100 °C), запобігання інтенсивному розчиненню у розплавленій сталі (верхнє значення 300 °C).

Досліди проводили за фіксованих розмірів армуючих частинок, оскільки траєкторії руху армуючих частинок залежать від їх геометричних розмірів (ваги) [6], 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 $\alpha = 2$ [8] 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.

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 [8].

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 апроксиму-

ючого полінома (4) та їх дисперсії розраховували за формулами, наведеними у [8].

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стюдента. Для цього розрахункове значення зіставляли 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 методикою [8]. 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.

Визначення оптимальних технологічних параметрів відцентрового армування. Результати дослідження

З метою підтвердження теоретичних обґрунтувань технологічних параметрів процесу відцентрового армування [6] і встановлення закономірностей зміни концентрації частинок карбіду вольфраму y_k в робочій зоні комбінованого зубця та його зносостійкості y_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 провели лабораторні експериментальні дослідження зубців, отриманих згідно з розробленою технологією відцентрового армування та дослідили кількість карбіду вольфраму в робочій армованій зоні ($Y_K, \%$) планіметричним методом, а також провели випробову-

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 _з | 2,12 | -0,168 | -0,275 | -0,046 | -0,067 | 0,154 | 0,156 | 0,070 | 0,079 |

вання на зносостійкість Y_з, робочої армованої зони зубців [7].

Функції відгуку як параметр оптимізації (концентрацію y_K та зносостійкість y_з) визначали експериментальним шляхом 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 $y_{K i(x_1 x_2 x_3 x_4)} = f(n_x n_z T_\phi T_a)$, а також його зношування $y_{z i(x_1 x_2 x_3 x_4)} = f(n_x n_z T_\phi T_a)$ 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

$$y_K = 60,5 + 1,367 x_1 + 2,867 x_2 - 3,340 x_1^2 - 5,240 x_2^2 - 1,802 x_3^2 - 1,065 x_4^2;$$

- для зношування

$$y_z = 2,120 - 0,168 x_1 - 0,275 x_2 - 0,046 x_3 - 0,067 x_2 x_4 + 0,154 x_1^2 + 0,156 x_2^2 + 0,070 x_3^2 + 0,079 x_4^2. \quad (6)$$

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 армуючи 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)

$$\Delta X_1 = \frac{240 - 120}{2} = 60 \text{ об/хв}; \quad x_1 = \frac{n_x - 180}{60}; \quad (7)$$

$$\Delta X_2 = \frac{750 - 450}{2} = 150 \text{ об/хв}; \quad x_2 = \frac{n_z - 600}{150}; \quad (8)$$

$$\Delta X_3 = \frac{335 - 205}{2} = 65 \text{ }^\circ\text{C}; \quad x_3 = \frac{T_\phi - 270}{65}; \quad (9)$$

$$\Delta X_4 = \frac{260 - 160}{2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}; \quad x_4 = \frac{T_a - 210}{50}. \quad (10)$$

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

- для концентрації

$$Y_K = -123,419 + 0,386 n_x + 0,285 n_z - 0,001 n_x^2 - 0,00023 n_z^2 - 0,00003 T_\phi^2 - 0,00018 T_a^2; \quad (11)$$

- для зношування

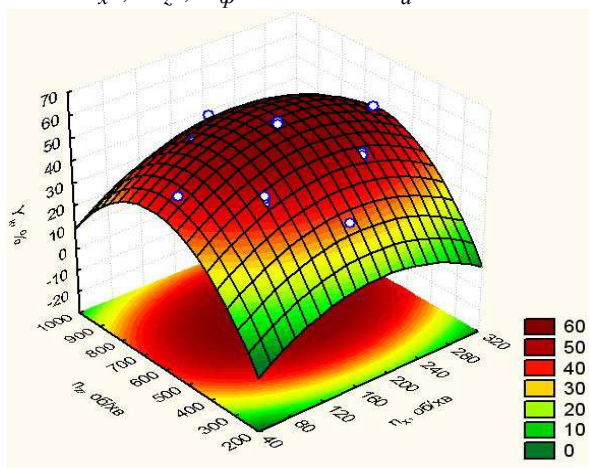
$$Y_z = 10,494 - 0,0022 n_x - 0,00899 n_z - 0,01156 T_\phi - 0,00001 n_z T_a + 0,00004 n_x^2 + 0,00001 n_z^2 + 0,00002 T_\phi^2 + 0,00003 T_a^2. \quad (12)$$

Знайдені рівняння регресії як в кодованих, так і в натуральних величинах можуть використовуватися для визначення концентрації армуючих частинок Y_{Ki} і зношування зубця Y_{zi} 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)}.

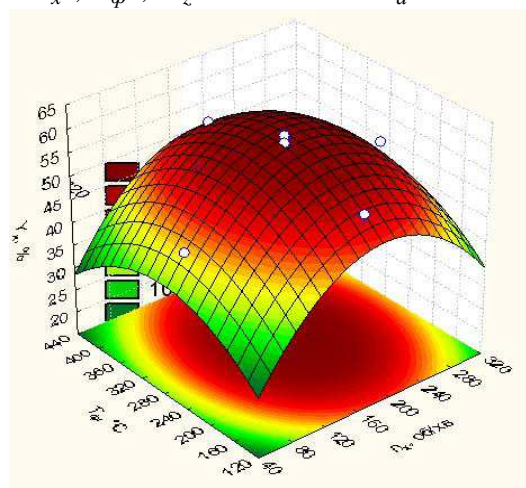
Після опрацювання експериментальних даних і перевірки значущості коефіцієнтів

$n_x, n_z, T_\phi = 270^\circ\text{C}$ і $T_a = 210^\circ\text{C}$



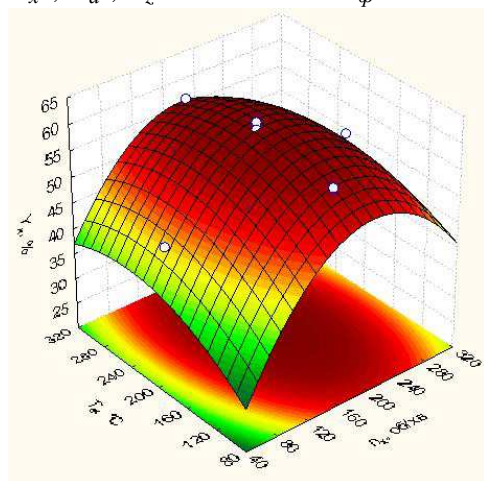
а

$n_x, T_\phi, n_z = 600$ об/хв і $T_a = 210^\circ\text{C}$



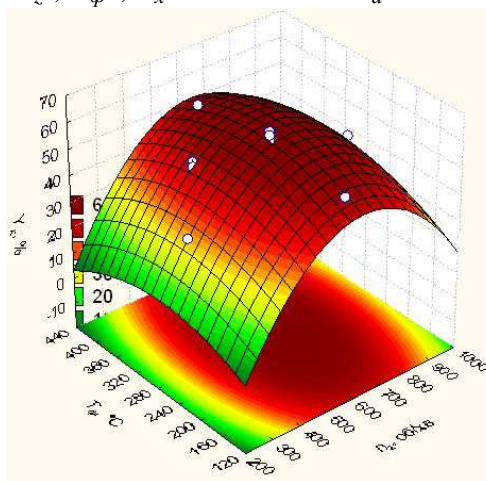
б

$n_x, T_a, n_z = 600$ об/хв і $T_\phi = 270^\circ\text{C}$



в

$n_z, T_\phi, n_x = 180$ об/хв і $T_a = 210^\circ\text{C}$



г

Рисунок 1 – Поверхні відгуку залежності концентрації карбіду вольфраму в робочій частині зубця від технологічних параметрів процесу відцентрового армування

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 Y_3 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 рис. 2).

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 . 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 рис. 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 [6] та за експериментальними даними, отриманими згідно з планом проведення планування експерименту та обробки його результатів представлені в табл. 4.

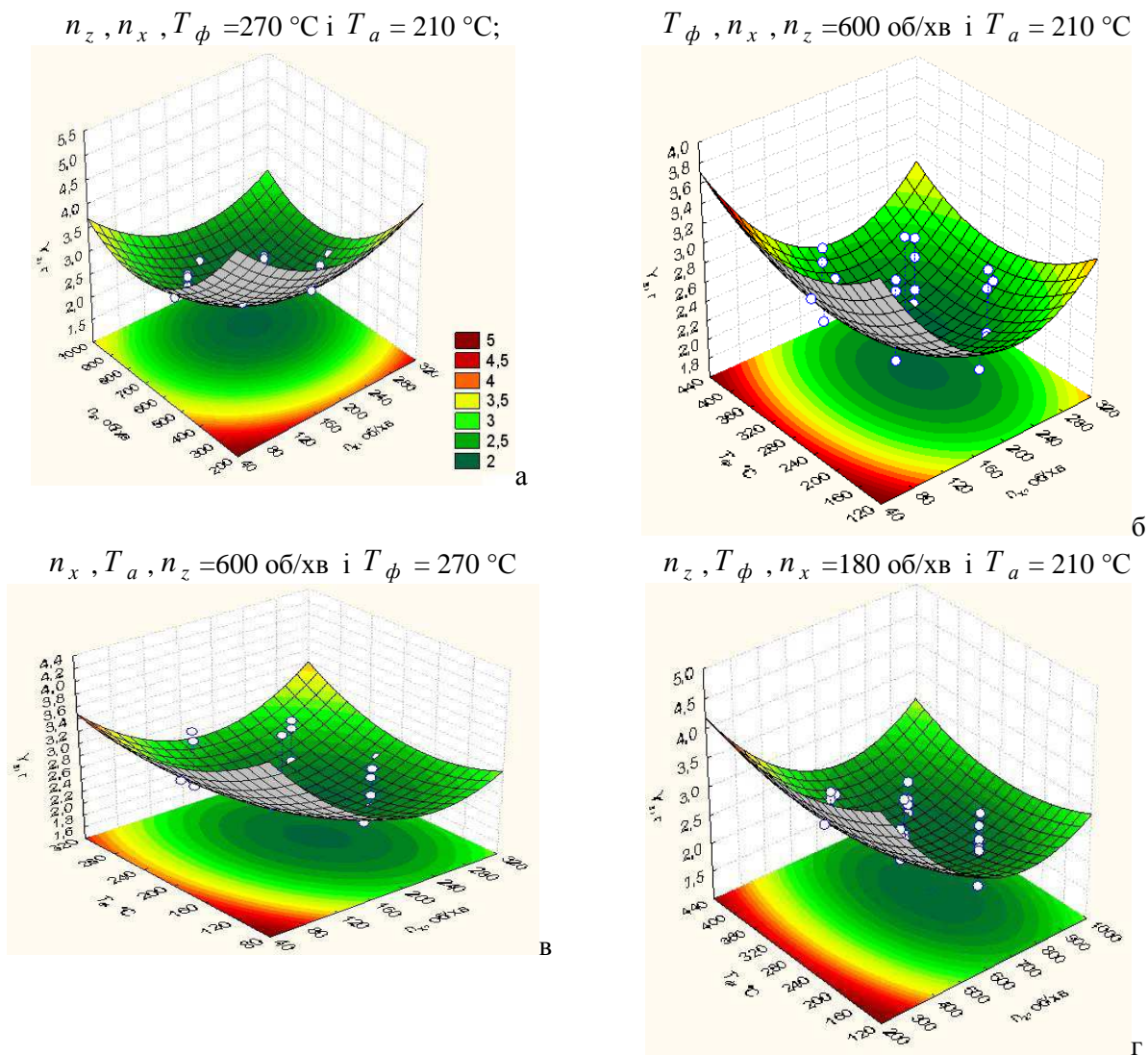


Рисунок 2 – Поверхні відгуку залежності зносу робочої частини зубця від технологічних параметрів процесу відцентрового армування

Табличні дані свідчать, що отримані експериментально значення частот обертання ливарної керамічної форми навколо горизонтальної та вертикальної осей для оптимальних значень концентрації армуючих частинок Y_k і 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 [6] не враховувалася зміна в'язкості сталі в процесі відцентрового армування. 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 сталевोї зв'язки.

Висновки

1. Величина концентрації частинок карбіду вольфраму в армованій зоні залежить від технологічних параметрів процесу відцентрового армування, причому більше впливають кінема-

тичні складові параметрів n_x і n_z , ніж температурні T_a і T_ϕ . Аналогічний вплив технологічні параметри мають і на величину зношування. При максимальній величині концентрації карбіду вольфраму в армованій зоні забезпечується мінімальне зношування.

2. Встановлено, що при використанні частинок карбіду вольфраму грануляцією 1,0 мм для відцентрового армування зубців з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної керамічної форми оптимальними є технологічні параметри процесу: $n_x = 217$ об/хв.; $n_z = 702$ об/хв.; $T_\phi = 270^\circ\text{C}$; $T_a = 208^\circ\text{C}$, які забезпечують мінімальне зношування та максимальну концентрацію карбіду вольфраму в робочій зоні.

3. Зносостійкість відцентрово армованих зразків більшою мірою залежить від концентрації карбіду вольфраму, а потім вже від структури металозв'язки. При концентрації карбіду вольфраму твердого сплаву 62 % зносостійкість збільшується в 1,5 рази порівняно з 30 % концентрацією.

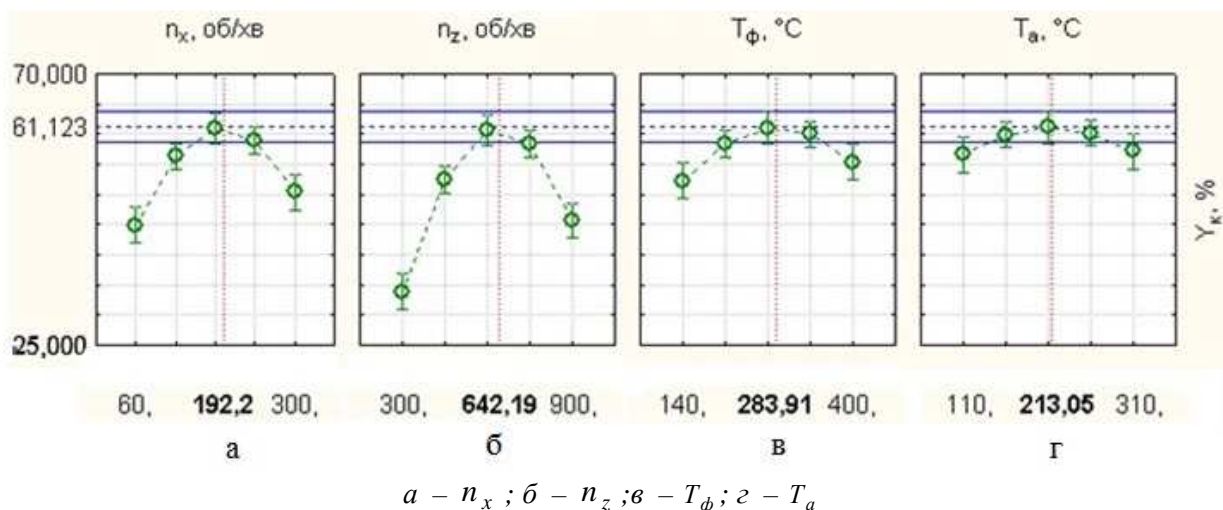


Рисунок 3 – Профілі функції залежності концентрації армуючих частинок від параметрів технологічного процесу

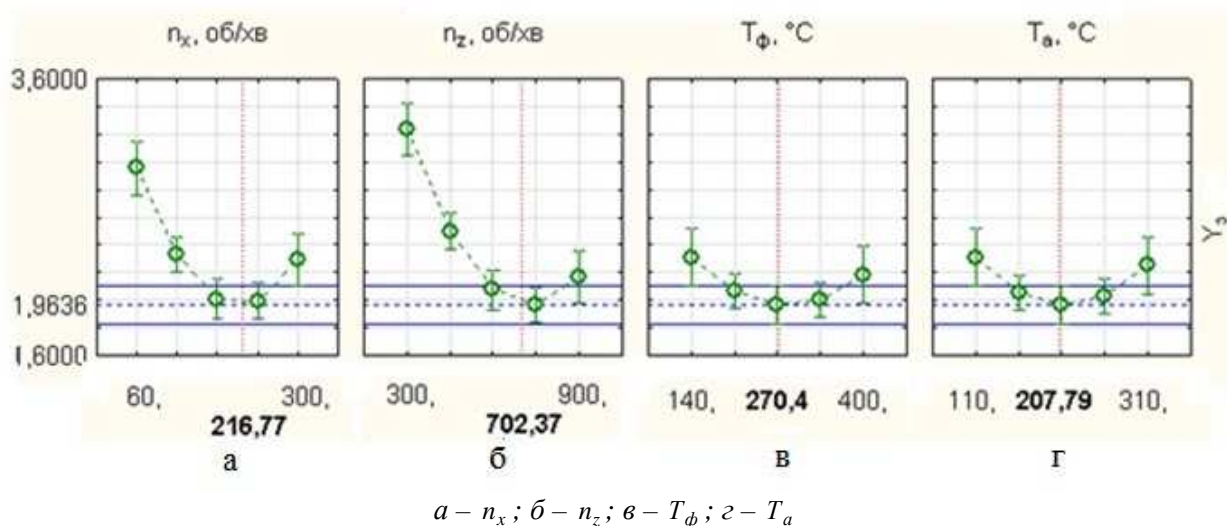


Рисунок 4 – Профілі функції залежності зношування робочої зони комбінованого зубця від параметрів технологічного процесу

Таблиця 4 – Теоретичні та експериментальні значення оптимальних параметрів 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 зносом | 217 | 20 | 702 | 17 | 270 | 208 |

У подальших дослідженнях планується розглянути вплив величини грануляції карбїду вольфраму на зносостійкість породоруйнівних елементів бурових долїт.

Лїтература

1 Бугай Ю. Н. Центробежно-армирований породоразрушаючий буровий інструмент / Ю. Н. Бугай, И. В. Воробьев. – Львов: Выща школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 208 с.

2 Пат. 72194 Україна, МПК В 22 D 13/02. Машина для відцентровго литва і армування виливків / 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.

3 Шуляр І. О. Відцентове армування озброєння бурових інструментів / І. О. Шуляр, В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Матеріали ІІ міжн. наук.-практ. конф. «Комплексне забезпечення якості технологїчних процесів та систем», м. Чернігів (23-25 травня 2012 р.): тези доп. – Чернігів, 2012. – С. 29.

4 Бугай Ю. Н. Автоматизация получения композиционных материалов для объемного упрочнения / Ю. Н. Бугай, Э. Б. Милевский, И. О. Загайдук // Автоматизация производственных процессов в машиностроении. – 1983. – Вып. 22. – С. 20-22.

5 Ясашин В. А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра: автореф. дисс. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (нефтяная и газовая промышленность)» / В. А. Ясашин. – М., 2009. – 48 с.

6 Шуляр І. Дослідження руху твердих частинок у рїдкому сплавї при відцентровму армуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми / І. Шуляр, М. Маковїйчук, Л. Роп'як // Наукові нотатки. – 2013. – № 40. – С. 321-330.

7 Сорокин Г. М. Износ зубьев шарошек буровых долот и методика испытания на износостойкость / Г. М. Сорокин // Труды МИНХ и ГП им. И. М. Губкина – М.: МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, 1961. – Вып. 35. – С. 27-30.

8 Евдокимов Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.

*Стаття надїйшла до редакційної колегїї
26.10.15*

*Рекомендована до друку
професором **Петриною Ю.Д.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Клочком А.А.***

*(НТУ «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків)*