

УДК 621.763

І. О. Шуляр*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВІДЦЕНТРОВО АРМОВАНОГО ОСНАЩЕННЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ**

Розроблено методику планування експериментальних досліджень для проведення ротабельного центрального композиційного експерименту 2^4 для змінних факторів: частот обертання ливарної форми навколо двох взаємно перпендикулярних осей, температур нагрівання керамічної форми і нагрівання твердого сплаву з метою визначення залежності концентрації армуючих частинок в робочій армованій зоні зубця, а також його зносостійкості.

Ключові слова: ротабельний центральний композиційний експеримент, відцентрове армування, концентрація армуючих частинок, зносостійкість

Рис. 4. Табл. 3. Форм. 12. Літ. 12.

И. О. Шуляр**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНО АРМИРОВАННОГО ВООРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Разработана методика планирования экспериментальных исследований для проведения ротабельного центрального композиционного эксперимента 2^4 для переменных факторов: частот вращения литейной формы вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, температур нагрева керамической формы и нагрева твердого сплава с целью определения зависимости концентрации армирующих частиц в рабочей армированной зоне зубца, а также его износостойкости.

Ключевые слова: ротабельный центральный композиционный эксперимент, центробежное армирование, концентрация армирующих частиц, износостойкость

I. O. Shuliar**RESEARCH OF CENTRIFUGAL REINFORCED EQUIPMENT PRODUCTION PROCESS BY MATHEMATICAL PLANNING METHOD**

The technique of experimental researches was developed for the rotatable central composite of experiment 2^4 for the variable factors: the frequency of rotation of the mold about two mutually perpendicular axes, the heating temperatures and heating the shaped ceramic carbide in order to determine the concentration of the reinforcing particles in the working zone of the pick-reinforced, and its durability.

Keywords: rotatable central composite experiment centrifugal reinforcement, centrifugal reinforcing the concentration of particles, durability

Вступ. Дослідження відцентрового армування проведені [1– 3] вказують на складні залежності руху армуючих частинок. Рух твердих частинок [4] і характер їх розподілу в об'ємі рідкого металу залежить від багатьох технологічних параметрів процесу армування – розмірів та питомої ваги твердих частинок, місця і швидкості їх введення, температури та в'язкості сплаву, а також від співвідношення величин кутових швидкостей ливарної форми відносно горизонтальної та вертикальної осей обертання. У свою чергу, від напрямку та вигляду траєкторій руху частинок твердого сплаву безпосередньо залежатимуть геометричні розміри та форма армованої зони виливка, що впливають на ефективність роботи породоруйнівних елементів.

Для оцінки впливу технологічних параметрів відцентрового армування з однією (вертикальною) віссю обертання ливарної форми на стійкість до абразивного та втомного зношування використовувалась лінійна модель [5, 6], однак вона не дозволяє здійснювати оптимізацію технологічного процесу.

Мета роботи – побудова математичної моделі процесу відцентрового армування, оцінювання впливу технологічних параметрів на концентрацію твердого сплаву в робочій зоні породоруйнівних елементів та їх зносостійкість для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу виготовлення деталей.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували технологічний процес відцентрового армування деталей з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми, який відбувався методом литва по витоплюваних моделях

Для проведення досліджень були виготовлені зразки за різних параметрів технологічного процесу армування [7]. Матеріал матриці – сталь 18ХН2МФЛ. Для армування застосували твердий

сплав «реліт» тому, що він ліпше змочувався рідкою сталлю, ніж безвольфрамкові тверді сплави. Питома вага реліту ($\rho_{\text{реліт}} = 15,7 \text{ г/см}^3$) відносно питомої ваги сталі ($\rho_{\text{ст}} = 7,88 \text{ г/см}^3$) більша, ніж в два рази, тоді як питома вага безвольфрамових твердих сплавів ($\rho_{\text{тв}} = 6,5 \text{ г/см}^3$) менша за питому вагу сталі. Кожна частинка твердого сплаву змочувалася рідким металом і в процесі її руху в розплавленому металі до периферії форми відбувалося сплавлення зерен по границях контакту, чим обумовлювалося краще закріплення зерен реліту в матриці, тоді як гранули безвольфрамових твердих сплавів не сплавлилися по границях і гірше закріплювалися в матриці, що призводило до їх викришування в процесі роботи зубця.

В процесі армування використовувався реліт різної грануляції. За рекомендаціями [8, 1] оптимальними з точки зору стійкості до різних видів зношування зубця є грануляція 1,0 мм. Дослідні зразки відливали використовуючи реліт грануляцією 0,63 мм, 1 мм і 1,6 мм, щоб упевнитися в правильності рекомендацій.

Проведені теоретичні дослідження процесу відцентрового армування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання [9] свідчать про нелінійний характер впливу технологічних параметрів на процес армування, зокрема, наприклад частот обертання ливарної керамічної форми навколо вертикальної та горизонтальної осей на траєкторії руху частинок для забезпечення їх попадання в робочу армовану зону деталі. Тому, як план проведення експерименту, для отримання регресійних моделей, тобто залежностей концентрації твердого сплаву та зносостійкості від частоти обертання ливарної форми навколо горизонтальної n_x і вертикальної осей n_z , температури нагрівання форми T_ϕ і частинок твердого сплаву T_a для оптимізації технологічних параметрів процесу відцентрового армування вибраний ротатабельний центральний композиційний план (РЦКП) [5]: $Y_K = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a)$; $Y_3 = f(n_x, n_z, T_\phi, T_a)$.

При такому виді експерименту досліді проводять за матрицею, яка містить три групи дослідів, які розміщені симетрично і на однаковій віддалі від центра експерименту:

- 1) ядро предсталає повнофакторний експеримент 2^4 ;
- 2) проведення дослідів у «зіркових» точках факторного простору;
- 3) проведення дослідів у центрі експерименту.

Загальна кількість дослідів в центральному композиційному експерименті (ЦКЕ) залежить від числа факторів. Вибір числа і координат зіркових точок повинно задовольняти наступним вимогам [10]:

- а) загальне число дослідів не сильно перевищує число коефіцієнтів регресії;
- б) фактори повинні змінюватись на невеликому числі рівнів.

У залежності від прийнятого принципу оптимальності матриці ЦКЕ, тобто від способу вибору величини зіркового плеча α і числа дослідів в центрі експерименту, ЦКЕ буває рототатабельний і ортогональний. Найбільше поширення в практиці досліджень має рототатабельний експеримент [11]. Матриці РЦКЕ повинні мати властивості рототатабельності, тобто на основі отриманої математичної моделі в РЦКЕ 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 в середині області експерименту постійну і незалежну від віддалі до центра експерименту.

РЦКЕ проводять на п'яти кодованих рівнях ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$) і 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 [10]

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

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

Таблиця 1. План-матриця проведення експериментів типу РЦКП

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

Нульовий рівень натурального значення фактора розраховували за формулою [10]

$$X_{i0} = \frac{X_{\max i} + X_{\min i}}{2} \quad (2)$$

де $X_{\max i}$ – максимальне натуральне значення (верхній рівень) фактора; $X_{\min i}$ – мінімальне натуральне значення (нижній рівень) фактора.

Інтервал варіювання i -го фактора визначали за формулою [10]

$$\Delta X_i = \frac{X_{\max i} - X_{\min i}}{2} \quad (3)$$

Основні параметри технологічного процесу відцентрового армування, які були вибрані як змінні фактори при проведенні експерименту:

X_1 – кількість обертів ливарної форми навколо горизонтальної осі; X_2 – кількість обертів ливарної форми навколо вертикальної осі; X_3 – температура нагрівання керамічної форми; X_4 – температура нагрівання армуючих частинок твердого сплаву.

Границі варіювання технологічних параметрів вибирали з таких міркувань:

- частоти обертання навколо горизонтальної та вертикальної осей вибирали за результатами комп'ютерного моделювання процесу відцентрового армування [9] та даними [1, 2];
- температуру нагрівання керамічної форми вибирали із умови забезпечення раціонального легування металозв'язки в армованій зоні деталі. За результатами досліджень [1] вона складає

100-400 °С. Збільшення температури вище 350-400 °С призводить до підвищення інтенсивності розчинення армуючих частинок твердого сплаву;

– температуру нагрівання твердосплавних армуючих частинок вибирали за рекомендаціями [1] з умови: зменшення ефекту «холодильників» при попаданні частинок в розплавлений метал – нижнє значення (100 °С), запобігання розчиненню у розтопленій сталі – верхнє значення (300 °С).

Досліди проводили за фіксованих розмірів армуючих частинок бо траєкторії руху армуючих частинок залежать від їх геометричних розмірів (ваги) [12], тому як фактор в регресійну модель не вводили діаметр армуючої частинки, а приймали за літературними даними [1] та результатами наших методичних дослідів – 1 мм.

РЦКЕ провели на п'ятьох рівнях варіювання факторів. У зіркових точках із урахуванням для чотирьох факторів величини плеча експерименту $\alpha = 2$ [11] та в центрі експерименту.

Вибрані фактори відповідають всім вимогам, які ставляться до них. Інтервали варіювання наведені в табл.2.

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 , °С | T_a , °С |
| 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 |

Точність підтримання параметрів технологічного процесу відцентрового армування складала 3-5 %.

Щоб виключити вплив нерегульованих і неконтрольованих факторів (перепади напруги живлення обладнання, температури води для охолодження індуктора) на значення параметрів оптимізації проводили рандомізацію план-матриці шляхом застосування методу випадкового балансу реалізованого способом випадкових чисел [10].

Для опису технологічного процесу (чотири фактори) використовували поліном другого порядку [10]

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

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 (параметри технологічного процесу).

Результати досліджень. З метою підтвердження теоретичних обґрунтувань технологічних параметрів процесу відцентрового армування і встановлення закономірностей зміни концентрації твердого сплаву Y_K в робочій зоні комбінованого зубця та його зносостійкості Y_3 , в залежності від кількості обертів ливарної форми навколо горизонтальної n_x та вертикальної n_z осей, температури форми T_ϕ і температури армуючих частинок T_a , провели лабораторні експериментальні дослідження зубців та дослідили кількість твердого сплаву в робочій армованій зоні Y_K , % планіметричним методом та зносостійкість Y_3 робочої армованої зони.

Функції відгуку (параметр оптимізації), тобто концентрацію Y_K та зносостійкість Y_3 визначені експериментальним шляхом, знаходили у вигляді полінома другого порядку (4).

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

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 |
| Знос, Y_3 | 2,12 | -0,168 | -0,275 | -0,046 | -0,067 | 0,154 | 0,156 | 0,070 | 0,079 |

Остаточні рівняння регресії, які відображають залежність концентрації армуючих частинок твердого сплаву в робочій армованій зоні комбінованого зубця $Y_{Ki}(x_1 x_2 x_3 x_4) = f(n_x n_z T_\phi T_a)$, а також його знос $Y_{3i}(x_1 x_2 x_3 x_4) = f(n_x n_z T_\phi T_a)$ залежно від зміни частоти обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі n_x , вертикальної осі n_z , температури нагрівання керамічної форми T_ϕ , температури нагрівання твердого сплаву T_a за результатами проведених РЦКЕ 2⁴ у кодованих величинах приймають вигляд:

- для концентрації

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

- для зносу

$$y_3 = 2,120 - 0,168x_1 - 0,275x_2 - 0,046x_3 - 0,067x_4 + 0,154x_1^2 + 0,156x_2^2 + 0,070x_3^2 + 0,079x_4^2 \quad (6)$$

Визначали основний рівень для кожного фактора:

- для частоти обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі n_x

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

- для частоти обертання ливарної форми навколо вертикальної осі n_z

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

- для температури нагрівання керамічної форми T_ϕ

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

- для температури підігрівання твердого сплаву T_a

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

Інтервали варіювання та кодовані значення кожного фактору набували значень відповідно до формул (3):

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

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

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

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

Після підстановки формул (7 – 10), перетворень і спрощень виразів (5) і (6) рівняння регресії Y_K і Y_3 у натуральних величинах приймають остаточний вигляд:

- для концентрації

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

– для зносу

$$Y_3 = 10,494 - 0,0022n_x - 0,00899n_z - 0,01156T_\phi - 0,00001n_zT_a + 0,00004n_x^2 + 0,00001n_z^2 + 0,00002T_\phi^2 + 0,00003T_a^2. \quad (12)$$

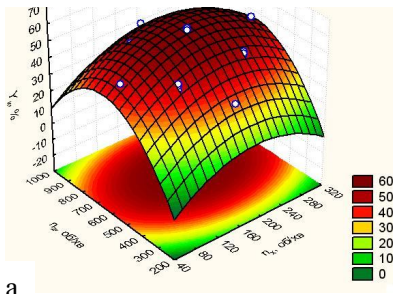
Знайдені рівняння регресії, як в кодованих, так і в натуральних величинах можуть використовуватися для визначення концентрації армуючих частинок Y_K і зносу зубця Y_3 в залежності від зміни частоти обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі n_x , вертикальної осі n_z , температури нагрівання керамічної форми T_ϕ , температури нагрівання твердого сплаву T_a , які знаходяться в межах $120 \leq n_x \leq 240$ об/хв, $450 \leq n_z \leq 750$ об/хв, $205 \leq T_\phi \leq 335$ °C, $160 \leq T_a \leq 260$ °C.

Для визначення впливу параметрів технологічного процесу (змінних факторів) на параметри оптимізації використали прикладну статистичну програму (STATISTIKA версія 6.0) для ПК побудувавши поверхні відгуку параметрів оптимізації та їх двомірні перерізи в залежності від двох змінних факторів $X_{i(1,2)}$ при постійних основних рівнях інших двох факторів $X_{i(3,4)}$.

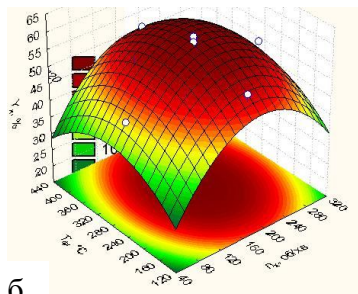
Після опрацювання експериментальних даних і перевірки значимості коефіцієнтів регресії та адекватності вибраної математичної моделі даному технологічному процесу, отримали проміжні рівняння регресії концентрації армуючих частинок Y_K і величини зносу Y_3 робочої зони комбінованого зубця в залежності від впливу двох змінних факторів.

Відповідно за рівняннями регресії побудовані поверхні відгуку та двомірні перерізи цих поверхонь концентрації армуючих частинок в армованій зоні і величини зносу робочої зони зубця в залежності від двох факторів, коли інші два залишаються сталими, рівними значенням на основному рівні (рис. 1 і 2).

$n_x, n_z, T_\phi = 270$ °C; $T_a = 210$ °C



$n_x, T_\phi, n_z = 600$ об/хв; $T_a = 210$ °C



$n_x, T_a, n_z = 600$ об/хв; $T_\phi = 270$ °C

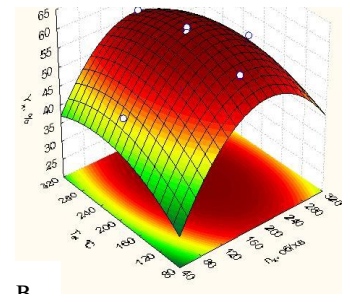
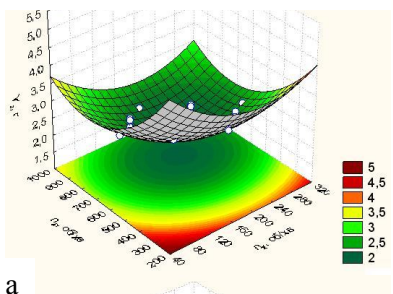
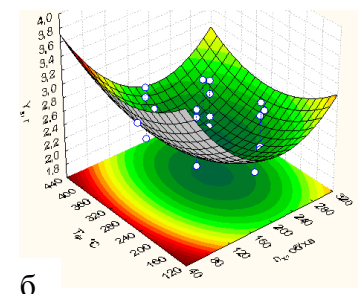


Рис. 1. Поверхні відгуку залежності концентрації робочої частини зубця від технологічних параметрів

$n_x, n_z, T_\phi = 270$ °C; $T_a = 210$ °C



$n_x, T_\phi, n_z = 600$ об/хв; $T_a = 210$ °C



$n_x, T_a, n_z = 600$ об/хв; $T_\phi = 270$ °C

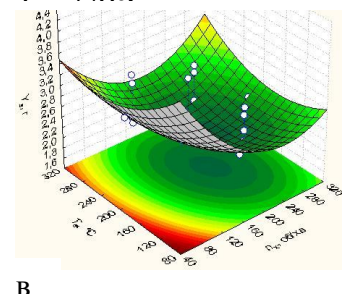


Рис. 2. Поверхні відгуку залежності зносу робочої частини зубця від технологічних параметрів

Як видно із рис. 3 та рис. 4, зміна величини концентрації армуючих частинок і величини зносу робочої зони комбінованого зубця залежать від параметрів технологічного процесу, які змінюються по параболічному закону і в точках екстремуму даних параметрів відповідно концентрація армуючих частинок буде найбільша, а величина зносу – найменша.

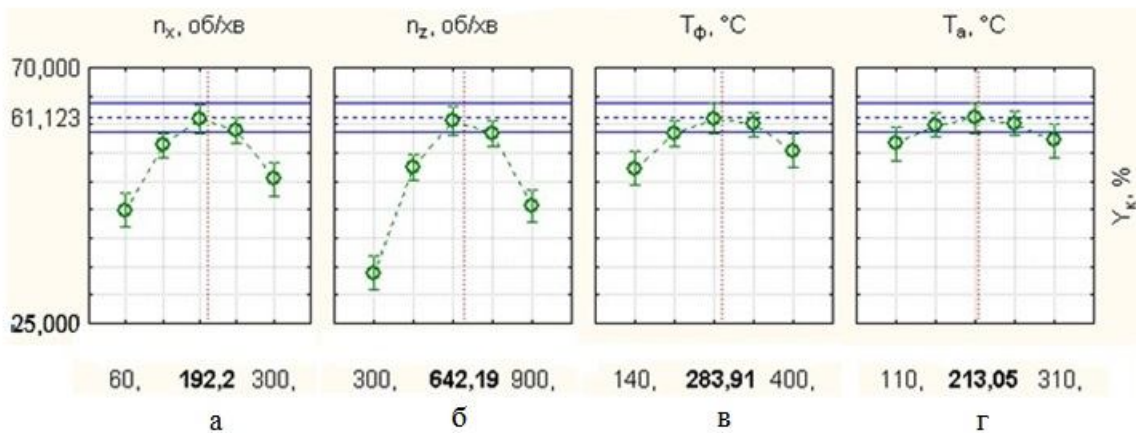


Рис. 3. Профілі функції залежності концентрації армуючих частинок від параметрів технологічного процесу: а – n_x ; б – n_z ; в – T_ϕ ; г – T_a .

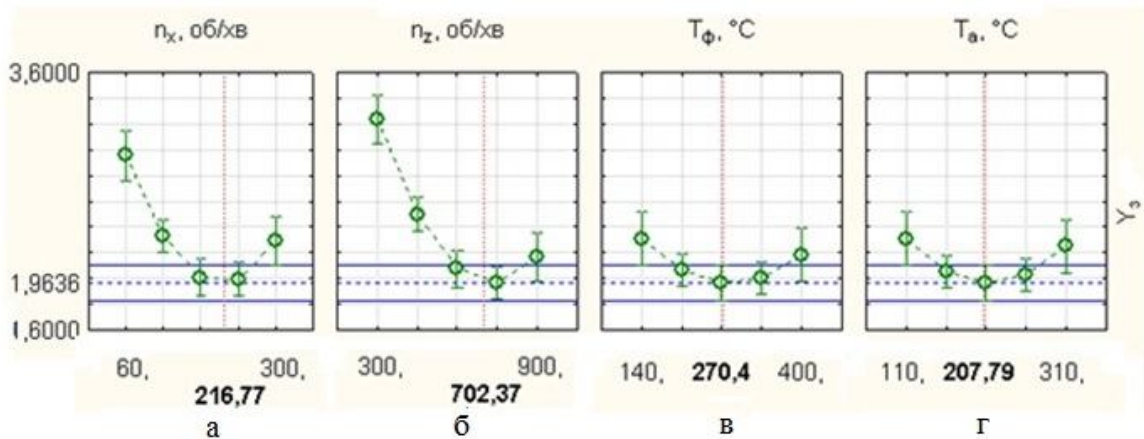


Рис. 4. Профілі функції залежності зносу робочої зони комбінованого зубця від параметрів технологічного процесу: а – n_x ; б – n_z ; в – T_ϕ ; г – T_a

Висновки. Розроблено методику планування експериментальних досліджень для проведення центрального композиційного експерименту РЦКЕ 2^4 для змінних факторів частоти обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі $n_x = 120-240$ об/хв., вертикальної осі $n_z = 450-750$ об/хв., температури нагрівання керамічної форми $T_\phi = 205-335$ °С, температури нагрівання твердого сплаву $T_a = 160-260$ °С з метою визначення залежності концентрації армуючих частинок в робочій армованій зоні зубця, а також його зносостійкості від залежних параметрів.

Величина концентрації твердого сплаву залежить від параметрів технологічного процесу, причому в більшій мірі впливають кінематичні складові параметрів n_x і n_z ніж температурні. Аналогічний вплив технологічні параметри мають і на величину зносу. При максимальній величині концентрації твердого сплаву в армованій зоні забезпечується мінімальний знос.

1. Бугай Ю. Н. Исследование технологии изготовления заготовок шарошек буровых долот центробежной отливкой с объемно-армированным вооружением и плавленной опорой: дис. ... канд. тех. наук / Юрий Николаевич Бугай. – М., 1976. – 308 с.
2. Борушак Б. О. Разработка технологического процесса центробежного армирования лопастных долот: дис. ... канд. Техн. наук: 05.02.08 / Богдан Онуфриевич Борушак. – Ивано-Франковск, 1993. – 187 с.

3. Ясашин В. А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра: автореф. дисс. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (нефтяная и газовая промышленность)" [Текст] / В. А. Ясашин. – М., 2009. – 48 с.
4. James M. Hill / Mathematics and mechanics of granular materials / [edited: James M. Hill, A.P.S. Selvadurai] // Reprinted from Journal of Engineering Mathematics, Vol . 52, Nos. 1–3 (July 2005). – 320 p.
5. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 281 с.
6. Бугай Ю. Н. Автоматизация получения композиционных матери-алов для объемного упрочнения / Ю. Н. Бугай, Э. Б. Милевский, И. О. Загайдук // Автоматизация производственных процессов в машиностроении: республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Львов. – 1983. – Вып. 22. – С. 20–22.
7. Шуляр І. О. Відцентрове армування озброєння бурових інструментів / І. О. Шуляр, В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Матеріали ІІ міжнар. наук.-прак. конф. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 23–25 трав. 2012 р.: тези доп. – Чернігів, 2012. – С. 29.
8. Бугай Ю. Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю. Н. Бугай, И. В. Воробьев. – Львов: Выща школа, 1989. – 205 с.
9. Шуляр І. Дослідження руху твердих частинок у рідкому сплаві при відцентровому армуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми / І. Шуляр, М. Маковійчук, Л. Роп'як // Наукові нотатки. – Луцьк. – 2013. – № 40. – С. 321–330.
10. Душинский В. В. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В. В. Душинский, Е. С. Пуховский, С. Г. Радченко. [Под общей ред. Г. Э. Таурита]. – К.: Техніка, 1977. – 176 с.
11. 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.
12. Композиционные материалы в технике / [Д. М. Карпинос, Л. И. Тучинский, А. Б. Сапожников и др.] – К.: Техніка, 1985. – 152 с.

Стаття прийнята до редакції 20.03.2015.