

УДК 621.01.357; 669.268.83

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65719

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ХРОМУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПОРШНЕВИХ НАСОСІВ

Л. Я. Роп'як

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник, доцент*

E-mail: l_ropjak@ukr.net

В. В. Остапович

Інженер*

E-mail: public@nung.edu.ua

*Кафедра комп'ютеризованого

машинобудівного виробництва

Івано-Франківський національний

технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15,

м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

Обґрунтовано застосування електрохімічного хромування в проточному електроліті для отримання покриття на сталі. Досліджено вплив технологічних параметрів процесу: масового співвідношення концентрацій компонентів, густини струму, швидкості потоку електроліту і його температури на мікротвердість, зношування, шорсткість та конусоподібність. Визначено оптимальні параметри для забезпечення мінімального зношування, а необхідну шорсткість і конусоподібність поверхні деталі запропоновано отримувати на подальших операціях механічної обробки

Ключові слова: технологічні параметри, електрохімічне хромування, проточний електроліт, мікротвердість, зношування, шорсткість, конусоподібність, механічна обробка

Обосновано применение электрохимического хромирования в проточном электролите для получения покрытия на стали. Исследовано влияние технологических параметров процесса: массового соотношения концентраций компонентов, плотности тока, скорости потока электролита и его температуры на микротвердость, износ, шероховатость, и конусообразность. Определены оптимальные параметры для обеспечения минимального износа, а необходимую шероховатость и конусообразность поверхности детали предложено получать на последующих операциях механической обработки

Ключевые слова: технологические параметры, электрохимическое хромирование, проточный электролит, микротвердость, износ, шероховатость, конусообразность, механическая обработка

1. Вступ

Деталі гідравлічної частини бурових поршневих насосів двосторонньої дії (втулки циліндрові та штоки поршнів) експлуатуються в екстремальних умовах – під дією високих тисків (знакозмінних навантажень) в агресивних середовищах з вмістом абразивних частинок при підвищених температурах промивальної рідини і контактують з гумовими ущільненнями. Все це призводить до інтенсивного корозійно-механічного зношування деталей. На протязі життєвого циклу поршневих насосів двосторонньої дії необхідно велику кількість разів здійснювати заміну втулок циліндрових і штоків поршнів внаслідок низького ресурсу їх роботи. Крім цього, для забезпечення в процесі буріння безперервної подачі промивальної рідини у свердловину в склад бурової установки входить два поршневих насоси один із них робочий, а другий – резервний, що вимагає значних кількостей запасних частин (змінних деталей).

В нафтогазовому машинобудуванні використовують зміцнювальні технології для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості втулок циліндрових і

штоків поршнів, які забезпечують формування поверхневих шарів з високими показниками якості робочої частини деталей машин: поверхнєве гартування струмами високої частоти, поверхнєве пластичне деформування, нанесення різного роду покриттів. Застосування останніх дозволяє здійснювати раціональне використання матеріалів: деталь виготовляють із конструкційної сталі, а на її робочу поверхню наносять зносостійке покриття необхідної товщини. Тому розроблення та оптимізація технологічних процесів формування зносостійких покриттів для підвищення якості поверхонь деталей поршневих насосів є актуальним і має важливе наукове, так і практичне значення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для підвищення довговічності змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії перспективними є технологічні методи, які забезпечують формування поверхневих шарів деталей машин з підвищеними фізико-механічними властивостями. Серед функці-

онально орієнтованих технологій, які забезпечують формування зносостійких покриттів слід відзначити наплавлення тугоплавких сполук, де як зв'язку застосовують мідно-нікелево-марганцевий сплав [1] при зміцненні деталей відцентрових насосів, а також тверді хромові покриття.

Поєднання високої твердості, зносостійкості, низького коефіцієнта тертя, високої корозійної стійкості та можливість наносити товсті шари дозволяє застосовувати хромові покриття як при виготовленні нових деталей, так і при відновленні зношених. Такі покриття широко використовуються для підвищення зносостійкості деталей двигунів внутрішнього згорання, поршневих насосів, гідро- і пневмоприводів тощо.

Автори [2] досліджували на зношування та корозійну стійкість дифузійні хромові покриття, отримані на вуглецевій сталі за температури 1000 і 1050 °С при витримці 6 і 9 годин відповідно з використанням різних концентрацій активатора. Результати випробувань показали, що такі покриття мають властивості близькі до твердих хромових покриттів, нанесених електрохімічним методом. Однак дифузійні покриття вимагають проведення додаткової термічної обробки і мають меншу товщину порівняно з електрохімічними покриттями.

Електрохімічному хромуванню в спокійному електроліті присвячена велика кількість досліджень. В роботі [3] дослідили формування електролітичних композиційних хромових покриттів із вмістом армуючих частинок оксиду алюмінію. Результати трибологічних досліджень показали, що введення частинок оксиду значно підвищує трибологічні властивості сформованого покриття.

Автори [4] досліджували нанесення хромових покриттів із електролітів з вмістом іонів тривалентного хрому та органічних додатків. Встановлено, що такі електроліти забезпечують отримання аморфних хромових покриттів, які містять у своєму складі вуглець або фосфор. При підвищених температурах відпаду в аморфних покриттях утворюють фази, що містять металевий хром і карбіди хрому або сполуки хрому з фосфором.

У дослідженнях [5] провели аналіз різних складів електролітів на основі три- і шестивалентних іонів хрому з точки зору токсичності та запропонували використовувати електроліт на основі тривалентного хрому, але зазначають, що недоліком такого електроліту є низька теплопровідність у порівнянні зі стандартним.

Тверді хромові покриття дослідники [6] отримували з електроліту з вмістом іонів тривалентного хрому як альтернатива хромуванню із стандартного електроліту. Було вивчено вплив густини струму, рН електроліту на формування покриттів товщиною 50–100 мкм. Встановлено, що хромові покриття мають високу зносостійкість та корозійну стійкість. Показано вплив термообробки на покращення властивостей покриттів.

В роботі [7] дослідили формування хромових покриттів із різних електролітів і вивчили їх структуру. Встановлено, що трибологічні властивості хромових покриттів, отриманих із електролітів, що містять іони тривалентного хрому, нижчі ніж у покриттів отриманих із електролітів, що містять шестивалентний хром. Показано, що застосування відпаду при 180 °С протя-

гом двох годин забезпечує підвищення зносостійкості хромового покриття.

Автори [8] дослідили вплив технологічних параметрів електрохімічного хромування на мікротвердість покриття та вміст в ньому водню. Покриття наносили із спокійного електроліту.

При дослідженні впливу технологічних параметрів процесу хромування мідних сплавів у спокійному електроліті на властивості покриттів встановлено, що важливим чинником є густина струму. Результати вивчення стану поверхні хромового покриття показали, що кількість тріщин залежить від густини струму [9].

На експлуатаційні показники сталевих деталей з хромовими покриттями впливають залишкові напруження і стан поверхні, тому дослідники приділяють значну увагу вивченню цих факторів. В роботі [10] дослідили вплив викінчувальної обробки поверхні хромованого покриття товщиною 25 мкм і 50 мкм, нанесеного на леговану сталь, алмазним інструментом, а також поліруванням. Вивчили шорсткість поверхні покриття, мікротвердість, залишкові напруження і втомну міцність при симетричному згині. Показано, що на операціях механічної обробки можна у хромовому покритті формувати напруження стиску і за рахунок цього підвищувати втомну міцність сталі з покриттям.

В роботі [11] показана можливість застосування електрохімічної обробки в потоці електроліту для забезпечення необхідної шорсткості поверхні хромового гальванічного покриття. Досліджено вплив густини струму та складу електроліту і запропоновано застосовувати нітратні електроліти.

При нанесенні покриттів в спокійному електроліті не забезпечується рівномірне нанесення покриття. В процесі електролізу при нанесенні хромового покриття на катоді (сталева деталь) осаджується металевий хром і виділяється водень, а також відновлюється шестивалентний хром до тривалентного. На аноді виділяється кисень і тривалентний хром відновлюється до шестивалентного. Виділення газів у процесі електролізу з одного боку призводить до зниження виходу хрому за струмом, а з другого – спричиняє наводнення поверхні сталевих деталей, нерівномірне нанесення покриття, а також спотворення форми деталі з покриттям, наприклад, виникнення конусоподібності. Для усунення (зменшення) негативного впливу газовиділення, а також постачання до поверхні деталі «свіжого» електроліту здійснюють формування покриттів у проточному електроліті.

Наведені результати корозійних досліджень [12] аморфних хромових покриттів, сформованих на мідній основі, за різних температур електроліту, густини струму та швидкостей потоку електроліту. Встановлено, що блискучі хромові покриття отримують при температурі електроліту 60 °С використовуючи середню швидкість потоку і високу густина електричного струму.

В праці [13] описана конструкція електрохімічної комірки для нанесення хромових покриттів на внутрішню поверхню труби в проточному електроліті, який містить тривалентні іони хрому. Рекомендовано проводити електроліз за температури електроліту 54 °С.

Автори [14] дослідили вплив проточного електролітичного хромування на границю втомної міцності

сталі. Встановили, що при швидкості потоку електроліту вище 0,8 м/с відбувається стабілізація температури електроліту в міжелектродному зазорі і границя втоми практично не змінюється.

Проведені дослідження напруженого стану штоків з хромовим покриттям показали його робоздатність при експлуатаційних навантаженнях поршневих насосів [15]. Результати роботи [16] свідчать про високу зносостійкість хромових покриттів, сформованих в проточному електроліті.

Аналіз літературних джерел присвячених електрохімічному хромуванню в проточному електроліті [12–14, 16] показав, що покриття наносять при більш високих густинах струму, і при цьому забезпечується більш рівномірне нанесення шару покриття з низькою шорсткістю, а також висока швидкість нанесення покриття та підвищений вихід хрому за струмом.

Наведені у технічній літературі дані не дають можливості здійснювати раціональний вибір технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті, що стримує його широке застосування для нанесення покриттів на циліндричні деталі гідравлічної частини поршневих насосів двосторонньої дії.

У зв'язку з цим виникає необхідність встановлення впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування з урахуванням масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту, густини струму, швидкості потоку електроліту та його температури на показники якості поверхні деталей.

3. Цілі та задачі дослідження

Метою даної роботи є побудова математичної моделі процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті та встановлення оптимальних значень технологічних параметрів для забезпечення отримання покриттів з максимальною мікротвердістю, мінімальним зношуванням при низькій шорсткості та конусоподібності циліндричної поверхні деталей.

Для досягнення вказаної мети були поставлені такі завдання:

- побудувати математичну модель і дослідити вплив технологічних параметрів процесу хромування на показники якості поверхонь деталей;
- встановити оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування, які забезпечують максимальну мікротвердість, мінімальне зношування при низькій шорсткості та конусоподібності циліндричної поверхні деталі з покриттям;
- обґрунтувати встановлення деталей в електрохімічній комірці.

4. Матеріали та методи дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті на властивості деталей

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

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточ-

ному електроліті на експлуатаційні властивості циліндричних деталей використовували розроблений технологічний процес та установку, яка споряджена системою автоматизованого керування. В склад установки входить універсальна електрохімічна комірка, яку можна використовувати як для нанесення металевих гальванічних покриттів, та і для плазмово-електролітичного окислювання [16]. Хромове покриття наносили на сталь із стандартного електроліту на основі хромового ангідриду та сірчаної кислоти. Аноди (сплав свинцю з сіркою (4–6) % і оловом (10–15) %) отримували литвом. Матеріалом зразків служила сталь 40ХН, яку поверхнево гартували струмами високої частоти і піддавали шліфуванню перед нанесенням хромового покриття, згідно існуючих вимог до підготовки поверхні $R_a=0,32$ мкм. При нанесенні покриття деталь розташовували в електрохімічній комірці у вертикальному положенні. Товщина нанесеного покриття складала 300 мкм.

4.2. Методики дослідження властивостей хромових покриттів

Вимірювання мікротвердості та товщини покриттів проводили на приладі ПМТ-3 при навантаженні на індентор (піраміда Вікерса) 1,0 Н на мікрошліфах.

Випробовування на зношування зміцнених зразків проводили на стенді для дослідження пар тертя при зворотно-поступальному русі, який відтворює реальні умови роботи підчас експлуатації металево-гумових пар тертя поршневих насосів: втулка циліндрова – гумово-металевий поршень; шток поршня – гумове ущільнення [17]. Величину зносу визначали гравіметричним методом.

Шорсткість поверхні (R_a) зразків перед нанесенням покриттів та після нанесення покриттів визначали розрахунковим методом на підставі результатів обробки профілограм, знятих на модернізованому приладі профілографі-профілометри моделі Р-201 виробництва заводу «Калибр».

Конусоподібність деталі – відхилення профілю повздожнього січення при якому твірні прямокутні, але не паралельні, визначали із залежності $\Delta_{\text{кон}} = (d_{\text{max}} - d_{\text{min}}) / 2$. Вимірювання проводили з використанням індикатора годинникового типу.

4.3. Методика планування експериментальних досліджень

Для оптимізації технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті провели планування експерименту в результаті реалізація якого побудували математичні моделі. Результати методичних досліджень технологічного процесу хромування вказують на нелінійний характер впливу густини струму та швидкості потоку електроліту на величину мікротвердості покриття.

Для проведення експериментальних досліджень, результати яких дозволяють розрахувати коефіцієнти рівнянь регресії, тобто залежностей для: мікротвердості $Y_1 = f(C, i, v, T)$, зношування $Y_2 = f(C, i, v, T)$, шорсткості $Y_3 = f(C, i, v, T)$ та конусоподібності $Y_4 = f(C, i, v, T)$ хромових покриттів на сталі 40ХН від технологічних параметрів процесу: масового співвідношення концентрації компонентів електроліту (C), густини струму (i), швидкості потоку електроліту (v) і температури

електроліту (Т) вибрали ортогональний центральний композиційний план другого порядку.

Вибір ортогонального центрального композиційного плану був зумовлений тим, що цей план є найбільш простим серед планів другого порядку. У цьому плані сума скалярних добутків векторів-стовпців матриці рівна нулю, і відповідно, всі коефіцієнти рівняння регресії визначаються незалежно один від одного та спрощуються розрахунки при оцінці коефіцієнтів рівняння регресії та їх дисперсій. Крім цього, менша величина зіркового плеча порівняно з плечем ротатбельного центрального композиційного плану дозволяє проводити експерименти при менших значеннях технологічних параметрів процесу нанесення хромового покриття. Крім цього, в разі коли коефіцієнт регресії є статистично не значимим, він може бути виключений без перерахунку решти коефіцієнтів рівняння [18].

Під час ортогонального центрального композиційного планування експерименту досліді проводять за матрицею, яка містить три групи дослідів:

- повний факторний експеримент 2^k ;
- проведення дослідів у зіркових точках;
- досліді у центрі плану експерименту.

Загальна кількість дослідів N залежить від числа факторів

$$N = 2^k + 2k + n_0, \quad (1)$$

де k – кількість факторів; n_0 – кількість дослідів у центрі плану експерименту (зазвичай становить один чи два досліді).

У нашому випадку для чотирьох факторів експерименту $k = 4$ і двох дослідів в центрі плану $n_0 = 2$ загальна кількість дослідів становить $N = 2^4 + 2 \cdot 4 + 2 = 26$.

Величину зіркового плеча α для ортогональних центральних композиційних планів розраховують за формулою [18].

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{n_c \cdot N} - n_c}{2}}, \quad (2)$$

де n_c – кількість дослідів повтофакторного експерименту ($n_c = 2^4 = 16$); N – загальна кількість дослідів ($N = 26$).

Після підстановки чисельних значень n_c та N в формулу (2) отримаємо величину зіркового плеча

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{16 \cdot 26} - 16}{2}} = 1,4826.$$

Ортогональне центральне композиційне планування експерименту проводять на п'яти кодованих рівнях: $-\alpha$; -1 ; 0 ; $+1$; $+\alpha$.

Інтервал варіювання факторів (технологічних параметрів процесу) повинен бути таким, щоб діапазон його зміни охоплював стаціонарну область факторного простору. Значення рівнів варіювання факторів вибирають з урахуванням тих їх значень, які використовуються в реальних технологічних процесах нанесення хромових покриттів. Повна матриця планування ортогонального центрального композиційного плану експерименту для чотирьох факторів наведена в табл. 1.

Технологічні параметри процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті (C ; i ; v ; T) –

незалежні змінні фактори мають різні розмірності, а їх числові значення – різні величини.

Для спрощення розрахунків при визначенні коефіцієнтів рівняння регресії та її оцінки здійснюють перехід від натуральних значень факторів до кодованих.

Кодовані значення i -го фактора x_i розраховували за формулою [18]

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3)$$

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

Нульовий рівень натурального значення i -го фактора визначали за формулою

$$X_{i0} = \frac{X_{\max i} + X_{\min i}}{2}, \quad (4)$$

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

Інтервал варіювання (півінтервал) натуральних значень i -го фактора розраховували за формулою

$$\Delta X_i = \frac{X_{\max i} - X_{\min i}}{2}. \quad (5)$$

Основні технологічні параметри процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті, що були вибрані як змінні фактори при проведенні планування експерименту:

X_1 – масове співвідношення концентрацій компонентів електроліту $[\text{CrO}_3]/[\text{H}_2\text{SO}_4]$ – хромового ангідриду і сірчаної кислоти (C);

X_2 – густина струму (i , A/dm^2);

X_3 – швидкість потоку електроліту в електрохімічній комірці (v , cm/c);

X_4 – температура електроліту (T , $^\circ\text{C}$).

Мінімальні, максимальні значення технологічних параметрів та інтервали їх варіювання вибрали, виходячи із реальних режимів нанесення електрохімічних хромових покриттів, які використовуються на практиці.

Вибрані технологічні параметри процесу хромування відповідають всім вимогам, які ставляться до факторів планування експерименту. Інтервали варіювання факторів експерименту наведені у табл. 2.

З метою усунення впливу неконтрольованих і нерегульованих чинників (перепадів напруги в електромережі живлення, температури навколишнього середовища в лабораторії та атмосферного тиску повітря) на значення параметрів оптимізації, досліді проводили у порядку вибраному методом випадкових чисел. Кожен дослід проводили двічі. В табл. 1 представлена матриця планування експерименту в кодованому вигляді. Досліджували мікротвердість, зношування, шорсткість та конусоподібність деталей з хромовими покриттями.

Таблиця 1

План-матриця проведення експериментів ортогонального центрального композиційного плану

Номер досліджу	Рівні факторів					Параметр оптимізації, Y		Середнє значення
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Y _{u1}	Y _{u2}	
1	+1	-1	-1	-1	-1	Y ₁₁	Y ₁₂	Y _{1c}
2	+1	-1	-1	-1	+1	Y ₂₁	Y ₂₂	Y _{2c}
3	+1	-1	-1	+1	-1	Y ₃₁	Y ₃₂	Y _{3c}
4	+1	-1	-1	+1	+1	Y ₄₁	Y ₄₂	Y _{4c}
5	+1	-1	+1	-1	-1	Y ₅₁	Y ₅₂	Y _{5c}
6	+1	-1	+1	-1	+1	Y ₆₁	Y ₆₂	Y _{6c}
7	+1	-1	+1	+1	-1	Y ₇₁	Y ₇₂	Y _{7c}
8	+1	-1	+1	+1	+1	Y ₈₁	Y ₈₂	Y _{8c}
9	+1	+1	-1	-1	-1	Y ₉₁	Y ₉₂	Y _{9c}
10	+1	+1	-1	-1	+1	Y ₁₀₁	Y ₁₀₂	Y _{10c}
11	+1	+1	-1	+1	-1	Y ₁₁₁	Y ₁₁₂	Y _{11c}
12	+1	+1	-1	+1	+1	Y ₁₂₁	Y ₁₂₂	Y _{12c}
13	+1	+1	+1	-1	-1	Y ₁₃₁	Y ₁₃₂	Y _{13c}
14	+1	+1	+1	-1	+1	Y ₁₄₁	Y ₁₄₂	Y _{14c}
15	+1	+1	+1	+1	-1	Y ₁₅₁	Y ₁₅₂	Y _{15c}
16	+1	+1	+1	+1	+1	Y ₁₆₁	Y ₁₆₂	Y _{16c}
17	+1	-1,4826	0	0	0	Y ₁₇₁	Y ₁₇₂	Y _{17c}
18	+1	+1,4826	0	0	0	Y ₁₈₁	Y ₁₈₂	Y _{18c}
19	+1	0	-1,4826	0	0	Y ₁₉₁	Y ₁₉₂	Y _{19c}
20	+1	0	+1,4826	0	0	Y ₂₀₁	Y ₂₀₂	Y _{20c}
21	+1	0	0	-1,4826	0	Y ₂₁₁	Y ₂₁₂	Y _{21c}
22	+1	0	0	+1,4826	0	Y ₂₂₁	Y ₂₂₂	Y _{22c}
23	+1	0	0	0	-1,4826	Y ₂₃₁	Y ₂₃₂	Y _{23c}
24	+1	0	0	0	+1,4826	Y ₂₄₁	Y ₂₄₂	Y _{24c}
25	+1	0	0	0	0	Y ₂₅₁	Y ₂₅₂	Y _{25c}
26	+1	0	0	0	0	Y ₂₆₁	Y ₂₆₂	Y _{26c}

$$S^2(Y) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 \tag{8}$$

Для опису функції відклику (параметра оптимізації) досліджуваного технологічного процесу нанесення електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті використали поліном другого порядку

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \tag{9}$$

де b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії, які характеризують вільний член рівняння, лінійні ефекти, ефекти взаємодії та квадратичні ефекти відповідно; x_i – фактори експерименту (технологічні параметри процесу); k – кількість факторів експерименту ($k = 4$).

Загальну кількість коефіцієнтів регресії у поліномі другого порядку визначають із виразу

$$\mu = 0,5(k+1)(k+2) \tag{10}$$

При $k = 4$ число коефіцієнтів регресії становить $\mu = 15$.

Для розрахунку оцінок коефіцієнтів рівняння регресії в матричній формі застосовують відому формулу

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \tag{11}$$

де \mathbf{B} – вектор-стовпчик елементами якого є коефіцієнти рівняння регресії (); \mathbf{X} – матриця незалежних змінних; \mathbf{X}^T – транспонована матриця; \mathbf{Y} – вектор-стовпчик результатів досліджень ($Y_T, Y_Z, Y_{Ш}, Y_K$ – мікротвердості, зношування, шорсткості та конусоподібності відповідно); $\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \mathbf{M}$ – інформаційна матриця; $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} = \mathbf{C}$ – матриця дисперсій – коваріацій (обернена до інформаційної матриці).

Для отримання симетричного ортогонального центрального композиційного плану другого порядку вибирають величину зіркового плеча α за формулою (2) і перетворюють квадратичні члени рівняння (11) таким чином

$$\mathbf{X}'_i = \mathbf{X}_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \mathbf{X}_{iu}^2 = \mathbf{X}_i^2 - \bar{\mathbf{X}}_i^2 \tag{12}$$

Таблиця 2

Кодування факторів та рівні їх варіювання при проведенні експериментів згідно ортогонального центрального композиційного плану

Рівні факторів	Кодовані значення				Натуральні значення			
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	співвідношення концентрацій С	густина струму і, А/дм ²	швидкість потоку v, см/с	температура електроліту T, °С
Основний рівень	0	0	0	0	70	100	85	55
Інтервал варіювання	1	1	1	1	20	40	45	15
Верхній рівень	+1	+1	+1	+1	90	140	130	70
Нижній рівень	-1	-1	-1	-1	50	60	40	40
Зіркові точки (+)	+1,4826	+1,4826	+1,4826	+1,4826	100	160	152	77
Зіркові точки (-)	-1,4826	-1,4826	-1,4826	-1,4826	40	40	18	28

Середні значення \bar{Y}_u для кожного із паралельних дослідів розраховували за формулою

$$\bar{Y}_u = \frac{1}{r} \sum_{v=1}^r Y_{uv} \tag{6}$$

де r – кількість паралельних дослідів ($r=2$); Y_{uv} – результати вимірювань.

Дисперсію кожного паралельного досліді визначають із виразу

$$S_u^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{v=1}^r (Y_{uv} - \bar{Y}_u)^2 \tag{7}$$

Після цього визначають дисперсію відтворення

Тоді замість матриці незалежних змінних X_1^2 отримуємо матрицю X_1 , в якій вектор-стовпчик ортогональні між собою. У зв'язку з цим в інформаційній матриці M елементи B_{0i} , B_{i0} і C_{ij} та в коваріаційній матриці C елементи C_{00i} , C_{i00} і C_{ijj} стають рівними нулю. Це свідчить про те, що матриці M і C – діагональні. Внаслідок цього всі коефіцієнти рівняння регресії (9) оцінюють незалежно один від одного.

Значимість отриманих коефіцієнтів рівнянь регресії (9) перевіряли за t -критерієм Стюдента. Коефіцієнт вважали статистично значимим за умови, що $|b_i| > t \cdot S(b_i)$, де t -критерій, вибраний з довідкової таблиці для рівня значимості 0,05 і степенів свободи f_E ; $S(b_i)$ – похибка коефіцієнта (тут під b_i розуміють b_0, b_{ij}, b_{ii}).

Статистично незначимі коефіцієнти відкидають і уточнюють рівняння регресії (9).

Після цього визначають дисперсію адекватності моделі

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2}{N - \lambda}, \quad (13)$$

де N – кількість дослідів ($N = 26$); λ – число значимих коефіцієнтів у рівнянні регресії; \bar{Y}_u – розрахункове значення параметра оптимізації.

Отримане рівняння регресії перевіряють на адекватність за допомогою F -критерію Фішера [18]

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2(Y)}. \quad (14)$$

Розрахункове значення F_p порівнюють із $F_{табл}$, вибраним із довідкової таблиці. Відповідно для степенів свободи f_{ad} і f_E та рівні значимості $\alpha = 0,05$.

При виконанні умови $F_p < F_{табл}$ рівняння регресії (9) можна вважати адекватним за прийнятого рівня значимості $\alpha = 0,05$. На основі рівнянь регресії (9) будували поверхні відгуку та розраховували рівні однакового виходу параметра Y на площині.

Для визначення оптимальних значень технологічних параметрів процесу хромування в проточному електроліті частинні похідні прирівнювали до нуля.

На підставі отриманих рівнянь регресії будували поверхні відгуку параметрів оптимізації від двох змінних технологічних параметрів, при двох інших, фіксованих на основному рівні, а також визначали оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування для забезпечення отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування за прийнятних значень шорсткості та конусоподібності циліндричної поверхні деталі з хромовим покриттям.

5. Результати дослідження показників якості деталей з покриттями

Для обґрунтування технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті та встановлення закономірностей зміни мікротвердості, зношування, шорсткості та конусо-

подібності циліндричної поверхні деталі з хромовим покриттям у залежності від масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту C , густини струму і швидкості потоку електроліту v та температури електроліту T провели лабораторні експериментальні дослідження зразків з хромовими покриттями, нанесеними за розробленою технологією. Для оцінки показників якості покриття вимірювали мікротвердість покриття, випробовували на зношування, розраховували шорсткість поверхні та конусоподібність.

Невідомі коефіцієнти рівняння регресії визначили матричним методом у кодованому вигляді. Оцінку значимості коефіцієнтів рівняння регресії перевірили при рівні 0,05 за допомогою t -критерію Стюдента. Статистично незначимі коефіцієнти були відкинуті. Після цього значимі коефіцієнти рівнянь регресії другого порядку були підставлені у формулу (9).

Функції відклику (параметр оптимізації), які відображають залежність мікротвердості хромового покриття Y_T , зношування Y_3 , шорсткості Y_{III} та конусоподібності циліндричної поверхні Y_K в залежності від масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту C , густини струму i , швидкості потоку v , температури електроліту T за результатами проведеного ортогонального центрального композиційного планування експерименту в кодованих значеннях змінних факторів набули такого вигляду для:

– мікротвердості

$$Y_T = 11.07657 + 0.67108x_1 + 1.00053x_2 + 0.34670x_3 + 0.09567x_4 + 0.06437x_1x_3 - 0.40563x_1x_4 + 0.27437x_2x_4 - 0.92906x_1^2 - 0.68566x_2^2 - 0.30578x_3^2 - 0.36037x_4^2; \quad (15)$$

– зношування

$$Y_3 = 0.104891 - 0.008455x_1 - 0.013980x_2 - 0.002595x_3 + 0.000052x_4 + 0.002312x_1x_4 - 0.003063x_2x_4 + 0.000437x_3x_4 + 0.007914x_1^2 + 0.008369x_2^2 + 0.001090x_3^2 + 0.001545x_4^2; \quad (16)$$

– шорсткості

$$Y_{III} = 0,578879 - 0,065933x_1 - 0,069011x_2 - 0,136940x_3 - 0,005x_1x_2 - 0,01x_1x_3 + 0,026250x_1x_4 - 0,026250x_2x_3 - 0,0225x_2x_4 - 0,01x_3x_4 + 0,033402x_1^2 + 0,033402x_2^2 + 0,037952x_3^2; \quad (17)$$

– конусоподібності

$$Y_K = 8.63989 - 0.93997x_1 - 1.05242x_2 - 1.98055x_3 - 0.00085x_4 - 0.09375x_1x_2 - 0.15625x_1x_3 + 0.34375x_1x_4 + 0.34375x_2x_3 - 0.28125x_2x_4 - 0.21875x_3x_4 + 0.46973x_1^2 + 0.58346x_2^2 + 0.58346x_3^2 - 0.09896x_4^2. \quad (18)$$

Для отримання рівнянь регресії другого порядку в натуральному вигляді визначили основний рівень для кожного технологічного параметру процесу електро-

хімічного хромування сталевих деталей в проточному електроліті та його інтервал варіювання:

– масове співвідношення концентрацій компонентів електроліту С

$$X_{01} = \frac{90+50}{2} = 70,$$

$$\Delta X_1 = \frac{90-50}{2} = 20;$$

– густини струму і

$$X_{02} = \frac{140+60}{2} = 100 \text{ А/дм}^2,$$

$$\Delta X_2 = \frac{140-60}{2} = 40 \text{ А/дм}^2;$$

– швидкості потоку електроліту v

$$X_{03} = \frac{130+40}{2} = 85 \text{ см/с}, \Delta X_3 = \frac{130-40}{2} = 45 \text{ см/с};$$

– температури електроліту Т

$$X_{04} = \frac{70+40}{2} = 55 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta X_4 = \frac{70-40}{2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Для перекодування значень технологічних параметрів процесу хромування після підстановки в формулу (3) величин основного рівня та інтервалу варіювання вона набуває вигляду для відповідних факторів:

$$x_1 = \frac{C-70}{20}, \tag{19}$$

$$x_2 = \frac{i-100}{40}, \tag{20}$$

$$x_3 = \frac{v-85}{45}, \tag{21}$$

$$x_4 = \frac{T-55}{15}. \tag{22}$$

Після підстановки виразів (19)–(22) в (15)–(18), проведення перетворень і спрощень рівняння регресії другого порядку для Y_T, Y_3, Y_{III}, Y_K в натуральних величинах технологічних параметрів набувають такого вигляду для:

– мікротвердості

$$Y_T = -16.1954 + 0.3874C + 0.0536i + 0.0413v + 0.2354T + 0.0005Cv - 0.0014CT + 0.0005iT - 0.0024C^2 - 0.0004i^2 - 0.0002v^2 - 0.0015T^2; \tag{23}$$

– зношування

$$Y_3 = 0.0363062 - 0.003677C - 0.001183i - 0.000249v - 0.000949T + 0.000008CT - 0.000005iT + 0.000001Tv + 0.000020C^2 + 0.000005i^2 + 0.000001v^2 + 0.000008T^2; \tag{24}$$

– шорсткості

$$Y_{III} = 1.95962 - 0.017998C - 0.004553i - 0.006072v - 0.000006Ci - 0.000011Cv + 0.000088CT - 0.000015iv - 0.000037iT - 0.000015Tv + 0.000082C^2 + 0.00002i^2 + 0.000019v^2; \tag{25}$$

– конусоподібності

$$Y_K = 28.23618 - 0.24487C - 0.07999i - 0.08182v - 0.04760T - 0.00012Ci - 0.00017Cv + 0.00115CT + 0.00019iv - 0.00047iT - 0.00032Tv + 0.00115C^2 + 0.00036i^2 + 0.00029v^2 - 0.00049T^2. \tag{26}$$

Після перевірки адекватності отриманих моделей другого порядку даному технологічному процесу хромування за F-критерієм Фішера виявилось, що F_p менше $F_{табл.}$, то гіпотеза про адекватність рівнянь регресії була прийнята.

Отримані рівняння регресії другого порядку в кодованих та натуральних величинах можуть використовуватися для розрахунку мікротвердості Y_T , зношування Y_3 , шорсткості Y_{III} і конусоподібності Y_K деталей з хромовим покриттям у залежності від зміни масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту С, густини струму і, А/дм², швидкості потоку електроліту v, см/с, температури електроліту Т, °С, які відповідно знаходяться в таких межах:

$$40 \leq C \leq 100; \quad 40 \leq i \leq 160;$$

$$18 \leq v \leq 152; \quad 28 \leq T \leq 77.$$

Були отримані також проміжні рівняння регресії для мікротвердості Y_T , зношування Y_3 , шорсткості Y_{III} , конусоподібності Y_K в залежності від зміни технологічних параметрів процесу хромування в проточному електроліті.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті (змінних факторів) на параметри оптимізації побудували поверхні відгуку та їх двомірні перерізи в залежності від двох змінних факторів (два інші фактори знаходились на постійному основному рівні), використавши вільне програмне забезпечення GNU Octave (рис. 1–4).

6. Обговорення результатів дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті на мікротвердість, зношування, шорсткість та конусоподібність

Аналіз отриманих рівнянь регресії другого порядку (23)–(26) та побудованих поверхонь відгуку (рис. 1–4), свідчить, що величина параметрів оптимізації для хромового покриття залежить практично від усіх технологічних параметрів процесу.

З використанням вільного програмного забезпечення GNU Octave знайшли оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування (табл. 3).

Слід зазначити, що за максимальної величини мікротвердості нанесеного хромового покриття забезпечується його мінімальне зношування, а оптимальні значення технологічних параметрів процесу знаходяться у межах факторного простору (рис. 1, 2).

Для параметрів оптимізації шорсткості та конусоподібності оптимальні значення технологічних параметрів процесу знаходяться поза межами факторного простору (рис. 3, 4).

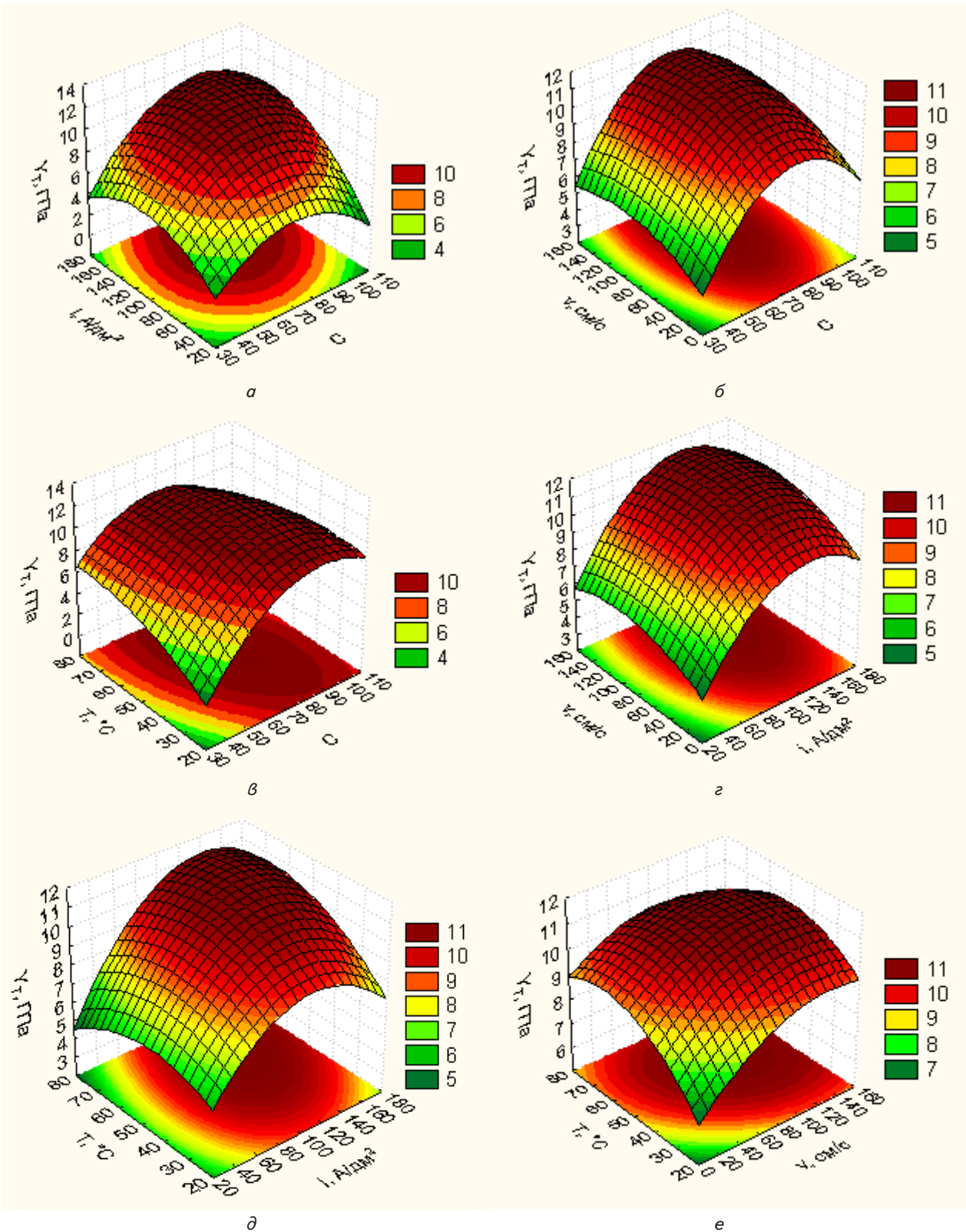


Рис. 1. Поверхні відгуків залежності мікротвердості покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті: *a* – C , i , $v=85$ см/с, $T=55$ °C; *б* – C , v , $i=100$ А/дм², $T=55$ °C; *в* – C , T , $i=100$ А/дм², $v=85$ см/с; *г* – i , v , $C=70$, $T=55$ °C; *д* – i , T , $C=70$, $v=85$ см/с; *е* – v , T , $C=70$, $i=100$ А/дм²

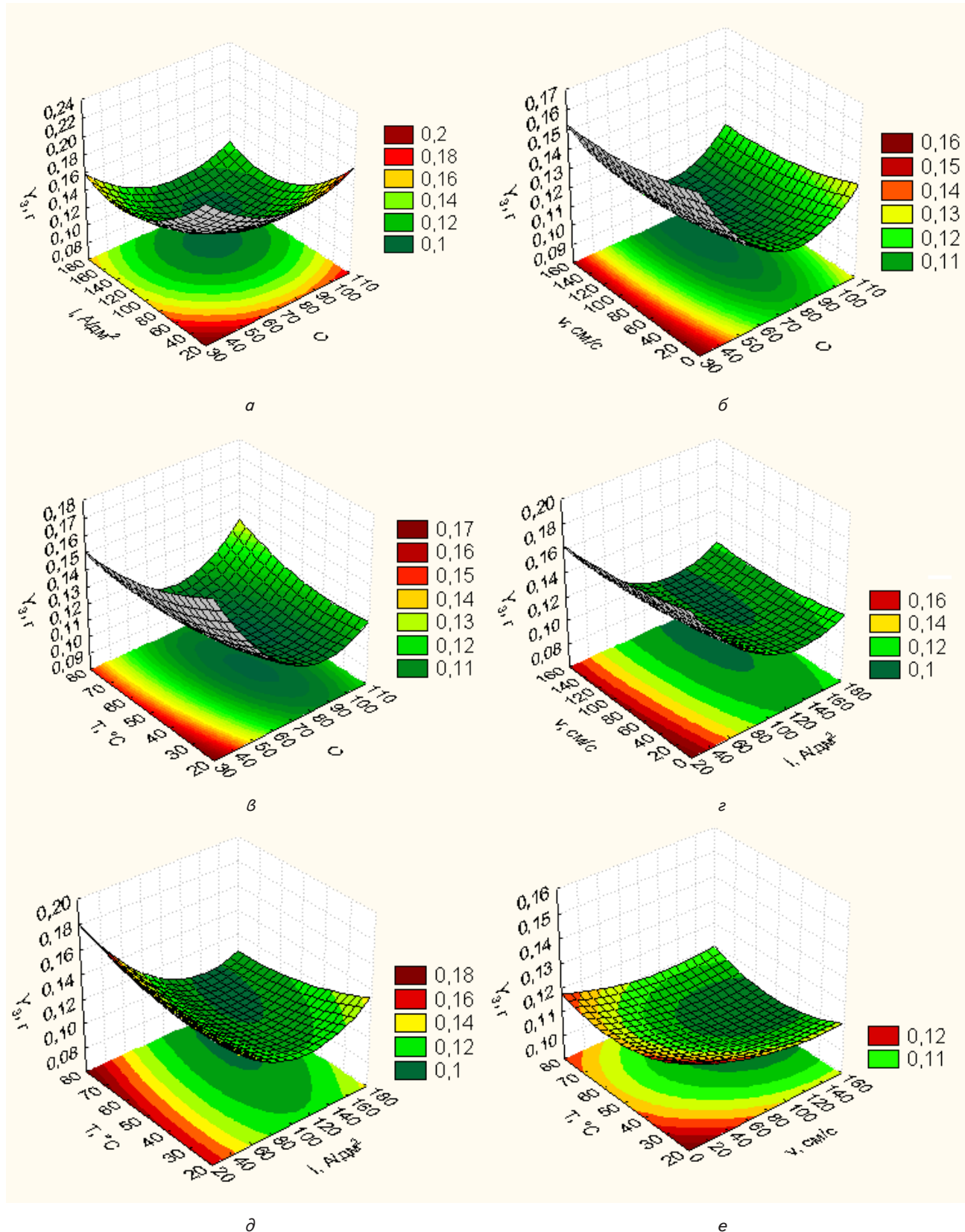


Рис. 2. Поверхні відгук залежності зношування покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті:
 а – C , i , $v=85$ см/с, $T=55$ °C; б – C , v , $i=100$ А/дм², $T=55$ °C;
 в – C , T , $i=100$ А/дм², $v=85$ см/с; г – i , v , $C=70$, $T=55$ °C;
 д – i , T , $C=70$, $v=85$ см/с; е – v , T , $C=70$, $i=100$ А/дм²

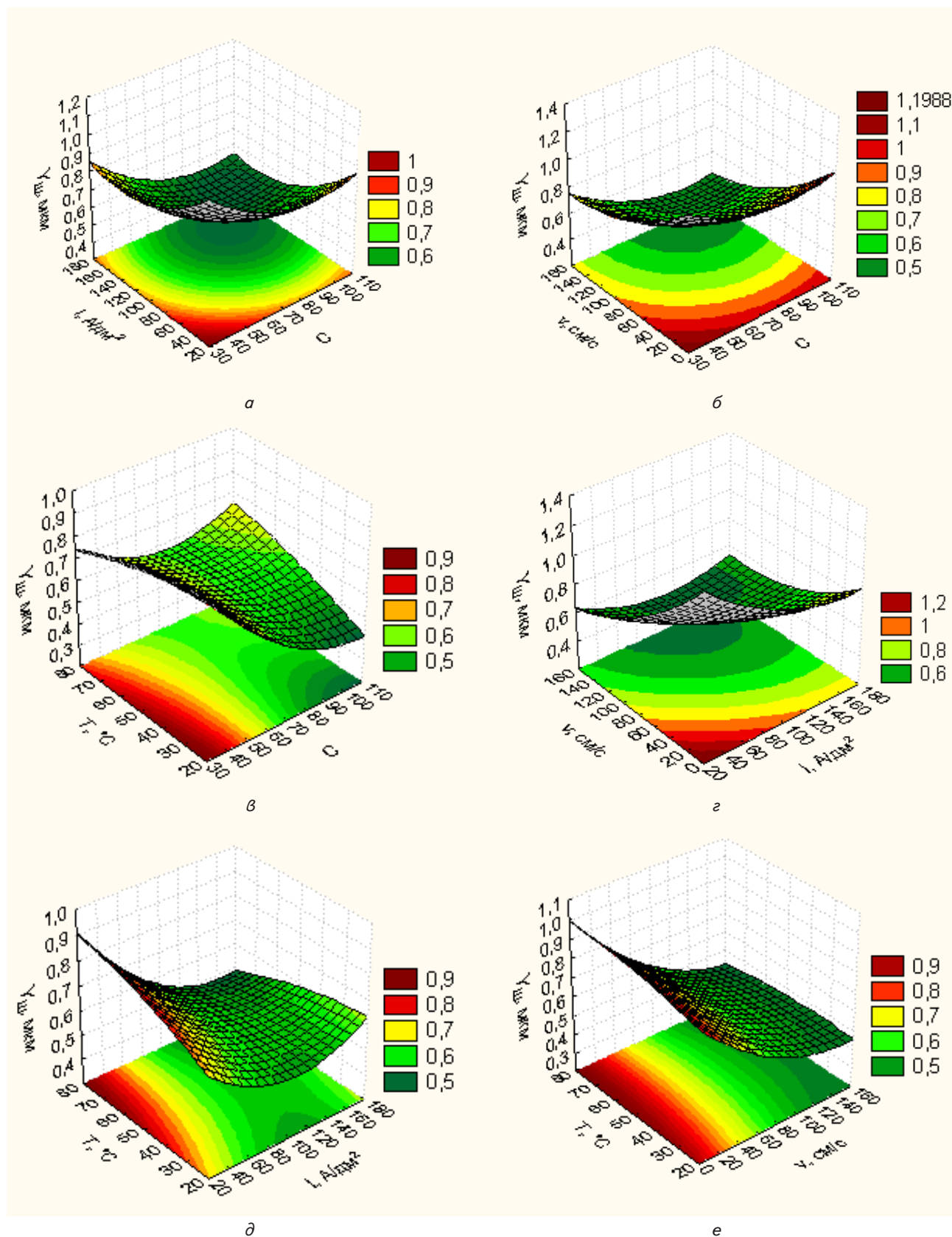


Рис. 3. Поверхні відгуку залежності шорсткості поверхні покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті:
 а – C , i , $v=85$ см/с, $T=55$ °C; б – C , v , $i=100$ А/дм², $T=55$ °C;
 в – C , T , $i=100$ А/дм², $v=85$ см/с; г – i , v , $C=70$, $T=55$ °C;
 д – i , T , $C=70$, $v=85$ см/с; е – v , T , $C=70$, $i=100$ А/дм²

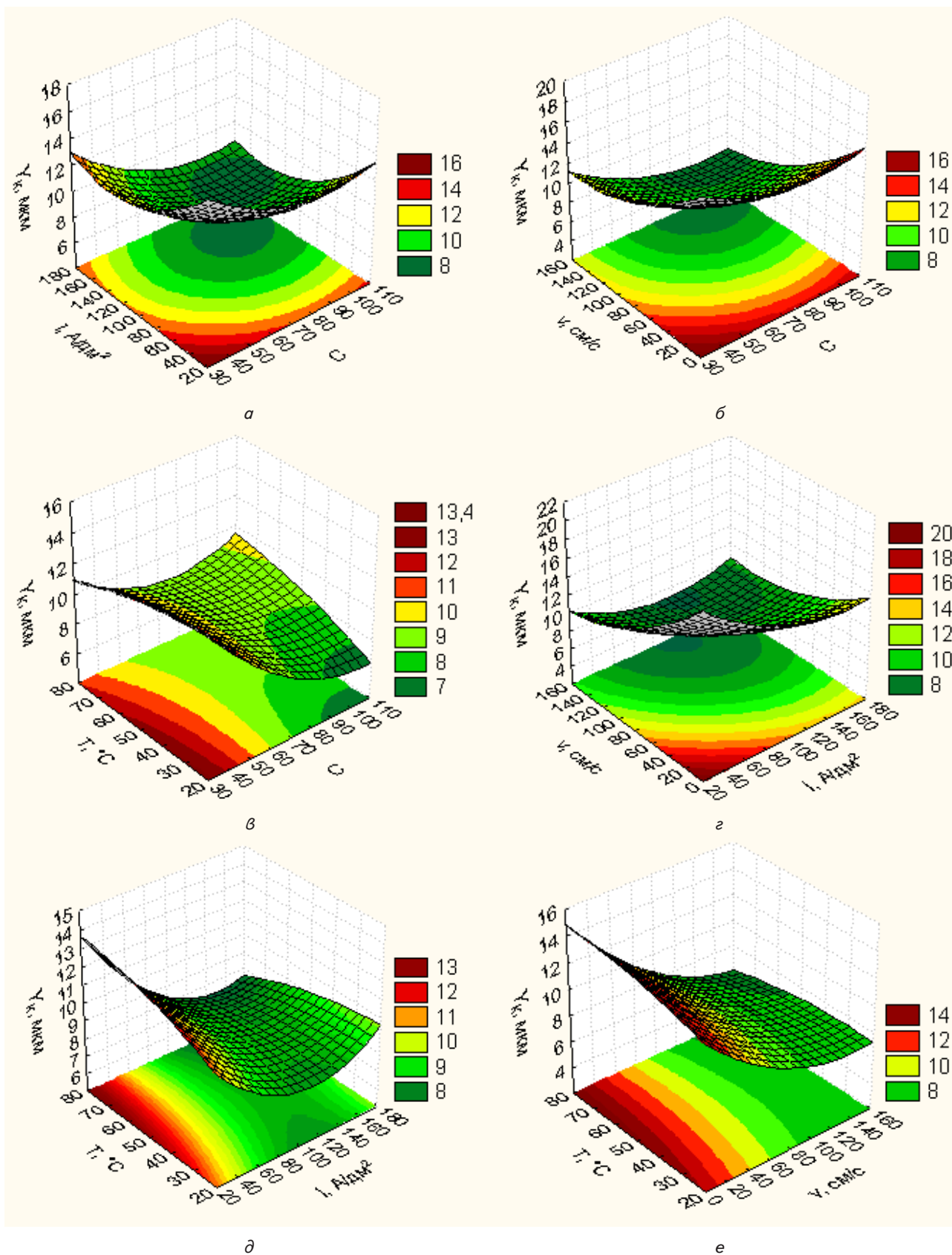


Рис. 4. Поверхні відгуку залежності конусоподібності поверхні покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті:
 а – C , i , $v=85$ см/с, $T=55$ °C; б – C , v , $i=100$ А/дм², $T=55$ °C;
 в – C , T , $i=100$ А/дм², $v=85$ см/с; г – i , v , $C=70$, $T=55$ °C;
 д – i , T , $C=70$, $v=85$ см/с; е – v , T , $C=70$, $i=100$ А/дм²

Таблиця 3

Оптимальні значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті

Параметри оптимізації		Оптимальні технологічні параметри			
назва, розмірність	числове значення	співвідношення компонентів C	густина струму i , А/дм ²	швидкість потоку v , см/с	температура електроліту T , °С
Мікротвердість Y_T , ГПа	11,900	80,9	134,5	112,2	54,9
Зношування Y_3 , г	0,090	79,5	133,5	114,7	59,3
Шорсткість $Y_{ш}$, мкм	0,422	93,7	120,9	167,6	60,2
Конусоподібність Y_K , мкм	6,191	98,2	119,1	162,7	52,8

Аналіз результатів планування експерименту, наведених у табл. 3 свідчить, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті для параметрів оптимізації: Y_T , Y_3 , $Y_{ш}$, Y_K відрізняються між собою. Для перших двох параметрів оптимізації – мікротвердості та зношування оптимальні значення технологічних параметрів процесу практично співпадають і знаходяться в межах діапазону варіювання факторів. Тобто при максимальній мікротвердості забезпечується мінімальне зношування хромового покриття. Оптимальні значення технологічних параметрів для забезпечення отримання мінімальної шорсткості та конусоподібності близькі між собою, але більш істотно відрізняються від оптимальних технологічних параметрів для забезпечення отримання максимальної мікротвердості та мінімального зношування. При цьому для отримання мінімальних величин $Y_{ш}$, Y_K оптимальне значення швидкості потоку електроліту виходить за межі діапазону варіювання факторів навіть з урахуванням величини зіркового плеча.

Оскільки зносостійкість є важливою експлуатаційною характеристикою для деталей гідравлічної частини поршневих насосів двосторонньої дії то за оптимальні значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті прийняли ті, які забезпечують отримання мінімальної величини зношування $Y_3=0,095$ г; $C=79,5$; $i=133,5$ А/дм²; $v=114,7$ см/с; $T=59,3$ °С. Підставивши ці значення оптимальних технологічних параметрів у формули (25) і (26) отримуємо розрахункові значення величин шорсткості $Y_{ш}=0,435$ мкм і конусності $Y_K=6,915$ мкм, тобто їх величини будуть дещо більшими від оптимальних $Y_{ш}=0,422$ мкм, $Y_K=6,191$ мкм. Необхідну шорсткість і конусоподібність поверхні деталей згідно технічних вимог на їх виготовлення у залежності від їх функціонального призначення доцільно отримувати на подальших операціях механічної обробки: шліфування та алмазного вигладжування.

Слід зазначити, що при електрохімічному хромуванні в проточному електроліті циліндричних деталей у вертикальному положенні максимальне збільшення діаметру для зовнішніх поверхонь і зменшення для внутрішніх поверхонь спостерігається у нижній частині деталі. Для усунення конусо-

подібності та підвищення точності деталей з покриттями їх необхідно перед хромуванням обмірювати і монтувати у вертикальному положенні в електрохімічній комірці навпаки, тобто для валів мінімальним діаметром деталі знизу, а для втулок, при нанесенні покриття на внутрішню поверхню – максимальним діаметром знизу.

Таким чином, дослідженнями показано можливість спрямованого керування процесом електрохімічного хромування в проточному електроліті шляхом зміни технологічних параметрів.

Саме тому отримані результати досліджень можуть вважатися за доказову базу можливості практичного застосування оптимальних значень технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті при серійному виготовленні втулок циліндричних і штоків поршнів насосів на спеціалізованих підприємствах, наприклад, ТзОВ «Інтербур» (м. Івано-Франківськ, Україна). У подальших дослідженнях планується розглянути питання механічної обробки електрохімічних хромових покриттів, нанесених у проточному електроліті.

7. Висновки

В результаті проведених досліджень технологічного процесу електрохімічного хромування сталі в проточному електроліті:

1. Побудовано математичну модель процесу на основі якої встановлено, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування для отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування практично співпадають, а для мінімальної шорсткості та конусоподібності не співпадають як з оптимальними технологічними параметрами для мікротвердості та зношування, так і між собою.

2. Встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних показників деталей з хромовим покриттям оптимізацію слід проводити за мінімальним зношуванням, яке досягається за таких оптимальних технологічних параметрів процесу: масове співвідношення концентрацій компонентів $C=79,5$; густина струму $i=133,5$ А/дм²; швидкість потоку електроліту в електрохімічній комірці $v=114,7$ см/с; температура електроліту $T=59,3$ °С, а необхідну шорсткість і конусоподібність поверхні деталі отримувати на подальших операціях механічної обробки.

3. Обґрунтовано вертикальне монтування циліндричних деталей в електрохімічній комірці для усунення конусоподібності, яка виникла на попередніх операціях механічної обробки: для валів мінімальним діаметром поверхні, на яку наносять покриття – знизу, а для втулок відповідно максимальним діаметром, для підвищення точності деталей з хромовими покриттями, так як при нанесенні покриття максимальне збільшення діаметру для зовнішніх поверхонь і зменшення для внутрішніх поверхонь спостерігається знизу-вверх.

Література

1. Prsyazhnyuk, P. Calculation of surface tension and its temperature dependence for liquid Cu-20Ni-20Mn alloy [Text] / P. Prsyazhnyuk, D. Lutsak, A. Vasylyk, Taer Shihab, M. Burda // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 12. – P. 346–350.
2. Fernandes, F. A. P. Wear and corrosion resistance of pack chromised carbon steel [Text] / F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, C. A. Picon, G. E. Totten, L. C. Casteletti // Surface Engineering. – 2012. – Vol. 28, Issue 5. – P. 313–317. doi: 10.1179/1743294411y.0000000079
3. Zeng, Z. Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings [Text] / Z. Zeng, J. Zhang // Surface and coatings technology. – 2008. – Vol. 202, Issue 12. – P. 2725–2730. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.10.008
4. Safonova, O. V. Chemical composition and structural transformations of amorphous chromium coatings electrodeposited from Cr (III) electrolytes [Text] / O. V. Safonova, L. N. Vykhodtseva, N. A. Polyakov, J. C. Swarbrick, M. Sikora, P. Glatzel, V. A. Safonov // Electrochimica Acta. – 2010. – Vol. 56, Issue 1. – P. 145–153. doi: 10.1016/j.electacta.2010.08.108
5. Protsenko, V. S. Chromium electroplating from trivalent chromium baths as an environmentally friendly alternative to hazardous hexavalent chromium baths: comparative study on advantages and disadvantages [Text] / V. S. Protsenko, F. I. Danilov // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2014. – Vol. 16, Issue 6. – P. 1201–1206. doi: 10.1007/s10098-014-0711-1
6. Li, B. S. Study of hard chromium plating from trivalent chromium electrolyte [Text] / B. S. Li, A. Lin // Key Engineering Materials. – 2008. – Vol. 373-374. – P. 200–203. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.373-374.200
7. Liang, A. Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr (III) electrolyte [Text] / A. Liang, L. Ni, Q. Liu, J. Zhang // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 218. – P. 23–29. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.12.021
8. Addach, H. Application of statistical design to optimisation of hardness and hydrogen content of chromium coating under pulse reverse electroplating [Text] / H. Addach, P. Bercot, M. Rezrazi, M. De Petris-Wery, H. F. Ayedi // Transactions of the IMF. – 2007. – Vol. 85, Issue 4. – P. 187–193. doi: 10.1179/174591907x216422
9. Jadid, A. P. Optimization of Electroplating Conditions of Chromium (VI) Using Taguchi Experimental Design Method [Text] / A. P. Jadid, M. Pourjafar, A. Banaei // Anal. Bioanal. Chem. – 2014. – Vol. 6. – P. 16–27.
10. Korzynski, M. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing [Text] / M. Korzynski, A. Pacana, J. Cwanek // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203, Issue 12. – P. 1670–1676. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.12.022
11. Silkin, S. A. Anodic dissolution of electrochemical chromium coatings in electrolytes for electrochemical machining: The dissolution rate and surface roughness [Text] / S. A. Silkin, V. I. Petrenko, A. I. Dikumar // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, Issue 1. – P. 1–8. doi: 10.3103/s1068375510010011
12. Sziráki, L. Electrochemical behaviour of amorphous electrodeposited chromium coatings [Text] / L. Sziráki, E. Kuzmann, K. Papp, C. U. Chisholm, M. R. El-Sharif, K. Havancsák // Materials Chemistry and Physics. – 2012. – Vol. 133, Issue 2-3. – P. 1092–1100. doi: 10.1016/j.matchemphys.2012.02.021
13. Kadaiwala, B. Functional Trivalent Chromium Electroplating of Internal Diameters [Electronic resource] / B. Kadaiwala, T. D. Hall, M. Inman // Product Finishing. – Available at: <http://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters>
14. Вихров, Н. М. Влияние проточного электролитического хромирования на предел выносливости стали [Текст] / Н. М. Вихров, В. В. Голицын // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – Вып. 4, № 4 (26). – С. 59–67.
15. Остапович, В. В. Дослідження напружено-деформованого стану вкритої хромовим покритвом ділянки штока поршневого насоса двосторонньої дії в умовах позаштатного навантаження [Текст] / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як, А. С. Величківч // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – № 2 (31). – С. 118–125.
16. Остапович, В. В. Вплив технології зміцнення на показники якості та експлуатаційні властивості змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії [Текст]: міжвуз. зб. / В. В. Остапович // Наукові нотатки. – 2015. – Вып. 52. – С. 126–134.
17. Гладкий, С. І. Розроблення обладнання для дослідження вузлів тертя, що працюють при зворотно-поступальному русі [Текст] / С. І. Гладкий, С. П. Палажченко // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2015. – № 2 (39). – С. 89–100.
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.