

Підвищення абразивної стійкості опори ковзання розчинозмішувача

С. В. Попов, С. М. Гнітько, А. В. Васильєв

Запропонований спосіб обробки зовнішньої та внутрішньої конічних поверхонь цапфи і вставки, що являють собою пару тертя ковзання опори розчинозмішувача. Обробка полягає у тому, що на конічні поверхні деталей, які були попередньо підготовлені точінням, наноситься зносостійкий матеріал у вигляді твердосплавного порошку на основі нікелю. Нанесення відбувається спеціальним пальником із бункером-дозатором, у який засипається порошок. Внаслідок змішування горючого газу (ацетилен та кисень) у пальникові із порошком з бункера, відбувається розплавлення.

Під час реалізації даного технологічного процесу із застосуванням методів математичного моделювання було знайдено оптимальні режимні параметри (витрата порошку ПГ10Н-01 – 33,5 г/хв.; витрата кисню – 7,0 л/хв.; тиск ацетилену – 0,043 МПа) газополуменевого наплавлення, які забезпечили максимальний ефект, тобто найбільшу міцність зчеплення (45 МПа) наплавленого покриття. Випробування якості наплавленого покриття здійснювалось за допомогою штифтового методу визначення міцності зчеплення нового покриття із основою на розривній машині.

Серія експериментальних досліджень щодо підвищення абразивної стійкості опори ковзання, а саме порівняння наплавленого покриття із іншими загальновідомими зносостійкими матеріалами, такими як сталь ШХ15 ХВГ, здійснювалась на спеціально розробленому дослідному стенді. Його конструкцію розроблено на базі вертикально-свердлильного настільного верстата із адаптацією його до умов робочого процесу, що відбувається у корпусі розчинозмішувача. Це наявність абразивного середовища, радіальних і осьових зусиль. Для визначення осьового навантаження на опору запропоновано конструкцію гідравлічного пристосування, яке складається із манометра, поршня, гільзи та кульки. Осьове навантаження знайдено для найбільш несприятливих умовах роботи змішувача. Його значення було реалізовано на дослідному стенді зношування. Окрім цього, проведено серію експериментальних досліджень із визначення оптимального кута конуса при вершині цапфи і вставки конічної опори ковзання для мінімального зношування.

Використання запропонованого способу газополуменевого наплавлення дозволить суттєво підвищити абразивну та корозійну стійкість опори ковзання, подовживши термін експлуатації розчинозмішувача у цілому, розширити міжремонтний цикл обладнання для приготування будівельних розчинних сумішей

Ключові слова: газополуменеве наплавлення, абразивне зношування, опора ковзання, твердосплавний порошок, технологічний процес

1. Вступ

Під час роботи технологічних машин виникають явища і процеси, що призводять до їх кінцевого виходу з ладу. Серед них необхідно відмітити абразивне зношування. Це поверхнєве руйнування деталей машин в результаті їх взаємодії із частинками високої твердості при високій швидкості взаємодії. Такими частинками можуть бути: нерухомо закріплені зерна, незакріплені частинки, вільні частинки у проміжках спряжених деталей, а також вільні частинки які затягуються до струменя рідиною або газом [1].

Існує багато технологічних методів підвищення абразивної стійкості деталей машин, що зазнають тертя, а саме: створення гальванічного покриття, анодування, насичення, наплавлення (ручне дугове покритими електродами, під флюсом дротами та стрічками, у середовищі захисних газів електродами, самозахисними порошковими дротами, електрошлакове, плазмове, лазерне, електронно-променеве, індукційне, газополумєнєве), кокільне виливання, плазмове гартування, лазерне зміцнення. Кожен із перелічених методів має свою сферу застосування, переваги та недоліки. За результатами детального аналізу [2, 3], для підвищення абразивної стійкості конічної опори ковзання робочого органу розчинозмішувача, що працює у будівельній розчинній суміші, рекомендовано метод газополумєнєвого наплавлення. Воно дозволяє гнучко та незалежно регулювати робочу температуру, контролювати витрату матеріалу, що наплавляється, не вимагає наявності складного технологічного обладнання, значних витрат енергії. Окрім того, забезпечує можливість регулювання товщини наплавленого шару за рахунок різних кутів нахилу заготовки, а також характеризується невисокою собівартістю.

Тому актуальними є дослідження процесів, що пов'язані із підвищенням стійкості до абразивного зношування із застосуванням технології газополумєнєвого наплавлення зносостійкого матеріалу на деталі пари тертя опори ковзання. Опора працює у складі робочого органу (стрічковий шнек) розчинозмішувача для приготування будівельних розчинних сумішей.

2 Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Опора ковзання, зображена на рис. 1, являє собою завершену складальну одиницю, що входить до складу мобільного розчинозмішувача, обладнаного насосом [4].

У роботі [2] детально описано принцип роботи опори. Пара тертя в опорі утворюється взаємодією вставки 5 (рис. 2) і цапфи 12 (рис. 3). Опора регулюється. Їх особливістю є те, що вона повністю замінює стандартну (опору кочення), яка розташовувалась із зовнішньої сторони корпусу змішувача та втрачала герметичність з часом.

Авторами [3] відзначено, що під час тривалих виробничих випробувань опори відбувається значне спрацювання вставки і цапфи. Виникає затирання робочого органу змішувача із днищем корпусу змішувача. Це призводить до поступового виходу із ладу робочого валу шнекового змішувача, внаслідок його просідання і остаточного заклинювання.

У статті [5] зроблено спробу дослідити тертя робочих поверхонь опори під дією навантаження, що прикладається. Здійснено обчислення величини спра-

цювання цапфи і вставки. Встановлено, що тиск на поверхні цапфи і вставки підпорядковується гіперболічній залежності. Запропоновано використати на тертьових поверхнях зносостійкі матеріали. Але експериментальні дослідження не були проведені.

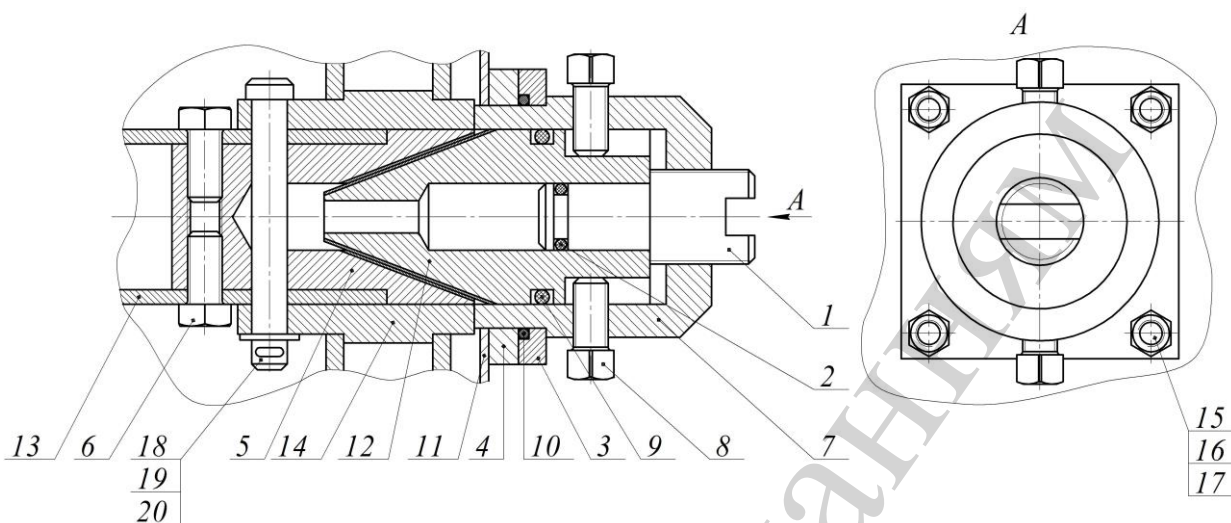


Рис. 1. Опора ковзання: 1 – гвинт притискання; 2, 9, 10 – кільце ущільнююче; 3, 4 – фланець; 5 – вставка; 6 – гвинт; 7 – корпус; 8 – гвинт регулювання; 11 – стінка змішувача; 12 – цапфа; 13 – вал змішувача; 14 – колесо цівкове; 15 – шпилька; 16 – гайка; 17 – шайба; 18 – палець; 19 – шплінт; 20 – штифт

Автори [6] повідомляють, що машини та механізми працюють у різних умовах, тому на їх зносостійкість суттєво впливає робоче середовище, у якому виникають тертя і зношування.

Проведені дослідження довели, що абразивна стійкість сталей залежить від їх твердості, хімічного складу та структури поверхневого шару. Для нелегованих сталей зі стабільною структурою зносостійкість прямопропорційна твердості поверхні тертя. Легуючі елементи, наприклад хром, підвищує зносостійкість. Запропоновано підвищувати зносостійкість сталей іонним азотуванням. Застосуванню газополуменевого наплавлення не приділено належної уваги.

У роботі [7] за допомогою методів математичного моделювання досліджено процес газополуменевого наплавлення порошку на основі нікелю. Модель використана для оцінювання зміни протягом часу об'єму металу покриття, оскільки розчинення карбиду відбувається із частинок, що мають форму сфер та циліндрів. Окрім того, досліджено швидкість руху та температура частинок порошку, залежно від їх форми та розмірів, початкових параметрів технологічного процесу.

Тими ж дослідниками проведено математичне моделювання факторів наплавленого покриття системи WC-Ni. До них віднесено: зміна температури, швидкість твердіння та теплові взаємодії між шарами покриття [8]. Визначено умови формування належних структур у покритті та підложці. У дослідженні відмічено, що основною проблемою, яка постає на даний час, є пошук саме оптимальних технологічних параметрів процесу наплавлення, які забезпечать максимальні експлуатаційні характеристики покриття.

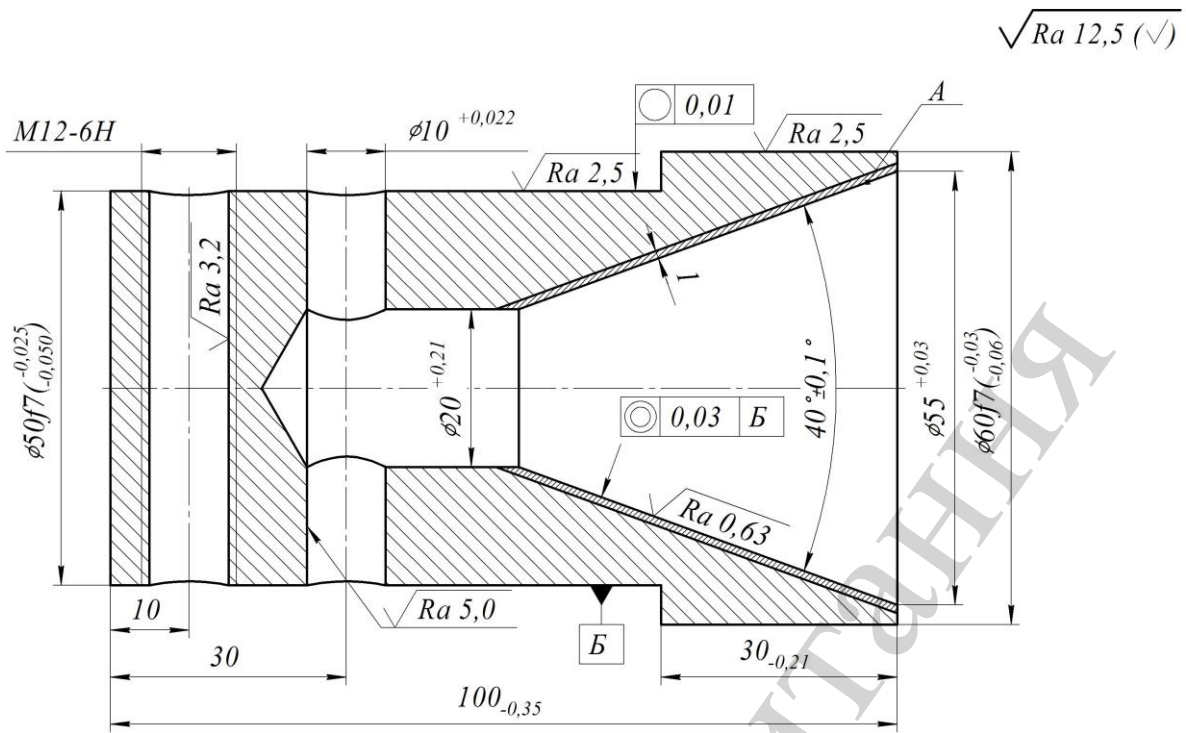


Рис. 2. Вставка опори ковзання

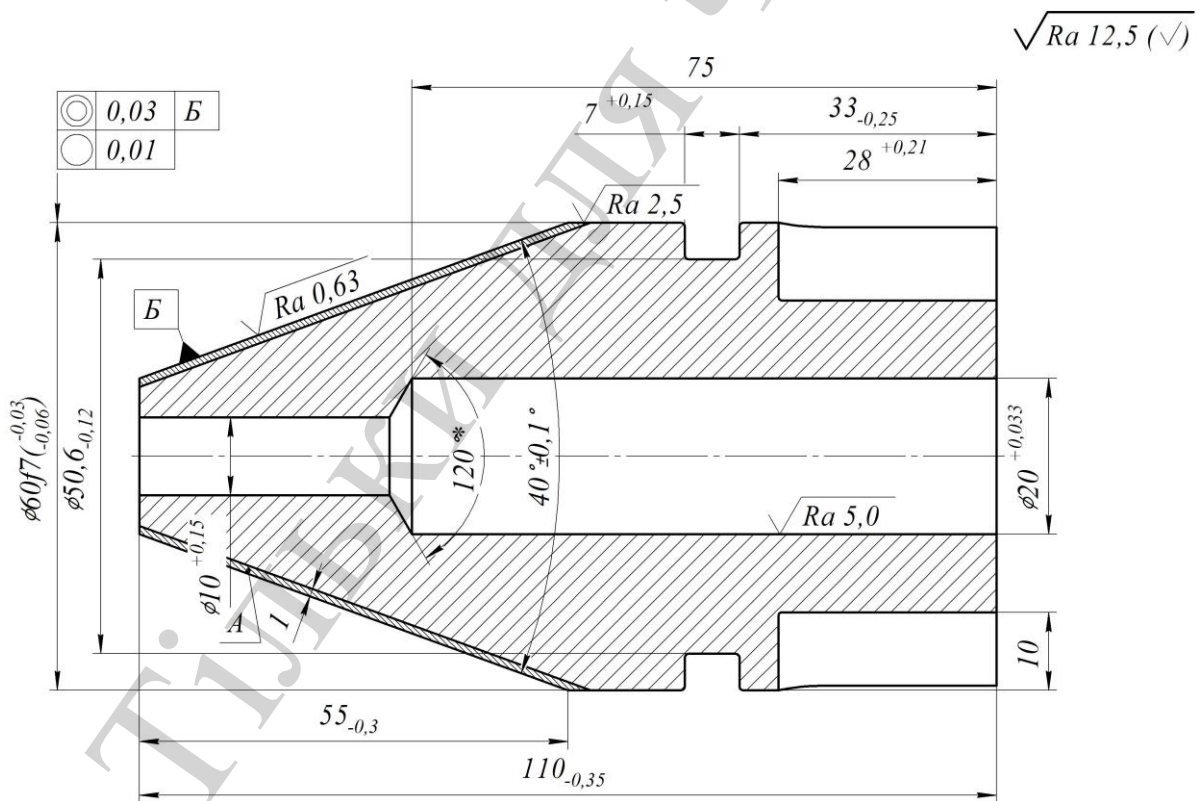


Рис. 3. Цапфа опори ковзання

Дослідженню ерозійно-корозійних характеристик самофлюсуючих покриттів системи Ni-Cr-Mo-Si-B, що нанесені на вуглецеву (BS970 EN8) та нержавіючу (UNS S31603) сталі, присвячено роботу [9]. Порівнювались зразки звичайного на-

плавлення та отримані в умовах вакууму із насиченням полімерним матеріалом. Робочим середовищем під час досліджень був струмінь морської води. Недоліком досліджуваних покриттів виявилось те, що полімер не змінював ерозійно-корозійну поведінку новоутвореної поверхні, хоча незначне підвищення стійкості усе ж таки спостерігалось. Тому проблема захисту металевих виробів від ерозійно-корозійного руйнування у морській воді залишається відкритою.

Детальному вивченню мікроструктури наплавленого покриття (нікель-хромова основа) товщиною 200 мкм присвячено роботу [10]. Застосовано рентгенівську дифракцію та електронну мікроскопію. Покриття мали шарувату структуру внаслідок осадження та охолодження послідовних розплавлених та частково розплавлених бризок. Досліджено структури матриць, збагачених нікелем та хромом. Питання зносостійкості новоутворених поверхонь залишені поза увагою. Зазначено лише, що мікротвердість новоутвореного покриття, що містить бор та вуглець, становить 6 ГПа.

Нанесення наплавленням на робочі поверхні тврдосплавного зносостійкого порошку на основі нікелю запропоновано авторами [11]. Для порівняння використовувались звичайна вуглецева та нержавіюча сталі. Досліджувалась стійкість до ерозії покриття із застосуванням кавітаційного апарату. Дане наукове дослідження присвячено не абразивній стійкості покриття, а кавітаційній.

У роботі [12] вивчено властивості зносостійкого шару на основі нікелю. Особливістю є те, що цей шар було додатково армовано частинками карбїду титана та карбїду бора. Зразки продемонстрували відмінні зносостійкі властивості, але ударна в'язкість була знижена. Це у подальшому може призвести до утворення тріщин. Останні проходять через увесь наплавлений шар, що є неприпустимим.

Поліпшенню стійкості до високотемпературного стирання покриттів $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ із додаванням WC, що нанесені високошвидкісним наплавленням із подальшою термічною обробкою, присвячена робота [13]. Для виявлення впливу додавання карбїду вольфраму на твердість та абразивну стійкість новоутворених поверхонь досліджувались порошки, отримані різними способами. Нанесені покриття піддавались термічній обробці для імітації умов експлуатації при підвищених температурах. Дослідження мікроструктури відбувалось методом рентгенівської дифракції, а твердість покриттів – мікро- та наноінденторами, діапазони температур від кімнатної до 800 °C. Твердість покриття підвищилась після термічної обробки. Це зумовлено виділенням вторинних карбїдів та зміцненням твердого розчину зв'язки вольфрамом. Окрім того, дослідження довели, що експериментальні покриття мають високу зносостійкість при кімнатній та підвищеній температурах. Недоліком є складність отримання даних порошків, а також необхідність подальшої термічної обробки. Це здорожує технологію, вимагає наявності додаткового обладнання.

У роботі [14] вивчалось нанесення нікелевих та нікель-інконельних порошків на поверхні нержавіючих сталей. Мікроструктура покриттів досліджувалась методами рентгенівської дифракції, електронної мікроскопії, енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії, а також випробуваннями на твердість. Проведені кавітаційні дослідження на ерозійну стійкість. Додавання інконелю

підвищує твердість та шпаринність покриттів. Але кавітаційна ерозія знижує величину втомної міцності отриманих покриттів.

За результатами проведеного літературного огляду очевидно, що дослідженню процесу наплавлення зносостійких порошоків на нікелевій основі присвячено чимало наукових робіт. Метод набув поширення завдяки його відносній простоті виконання та низькій вартості. Поряд із цим, проблемними є питання, що пов'язані із визначенням оптимальних технологічних параметрів наплавлення для конкретних випадків, мікроструктури новоутворених покриттів, їх впливу на абразивні та корозійні властивості виробів, міцності зчеплення із основним матеріалом, швидкості охолодження та твердіння нанесеного матеріалу, процесів взаємодії між новоутвореними шарами тощо. Окрім того, інтерес являють собою процеси горіння різних горючих газів та парів у суміші із киснем, рівномірна подача матеріалу, що наплавляється, у високотемпературну зону горіння. Застосування саме покриття на нікелевій основі зумовлено його високою як абразивною так і корозійною стійкістю.

Отже, процес газополуменевого наплавлення зносостійкого порошку із нікелевою основою на робочі поверхні пари тертя, виготовленої з низьковуглецевої сталі підвищеної пластичності потребує подальшого вивчення. Особливо це стосується підвищенню абразивної стійкості конічних опор ковзання оригінальної конструкції, що входять до складу розчинозмішувача.

3 Ціль та задачі дослідження

Мета дослідження – зменшення величини абразивного зношування цапфи і вставки конічної опори ковзання, що працює у складі шнекового робочого органу розчинозмішувача і взаємодіє із будівельною розчинною сумішшю.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- розробити математичну модель, що адекватно характеризує технологічний процес газополуменевого наплавлення твердосплавного зносостійкого порошку на нікелевій основі;
- змодельовати на дослідному стенді процес зношування пари тертя у абразивному середовищі під дією прикладених навантажень;
- запропонувати методику визначення величини осьового навантаження, що зазнає опора ковзання під час робочого процесу;
- провести серію експериментальних досліджень щодо визначення зносу пар тертя опори ковзання відносно конструктивного виконання цапфи і вставки опори ковзання, матеріалу виробів, робочого середовища;
- визначити оптимальні параметри технологічного процесу газополуменевого наплавлення робочих поверхонь вставки і цапфи опори ковзання розчинозмішувача.

4 Матеріали і методи досліджень абразивної стійкості опори ковзання розчинозмішувача

Матеріалом для виготовлення вставки та цапфи за умови подальшого створення зносостійкого покриття обрана сталь 25. Це низьковуглецева конструкційна сталь невеликої міцності, але високої пластичності, застосовується

для виготовлення із прокату, поковок, труб, листів, стрічок і дроту, різних деталей. Остаточна термічна обробка у випадкові, що розглядається, не потрібна.

Хімічний склад і механічні властивості сталі 25 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад і механічні властивості сталі 25 (ГОСТ 1050-2013)

Марка матеріалу	Хімічний склад, %								Механічні властивості, %			
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Сталь 25	0,22–0,30	0,17–0,37	0,50–0,80	до 0,30	до 0,035	до 0,030	до 0,25	до 0,30	275	450	23	50

На початку обробки робочим поверхням третьової пари надано шорсткість 12,5 мкм за шкалою R_a . Під час газополуменевого наплавлення використано спеціальний пальник, що містить дозатор для порошкового матеріалу. Використовувався твердосплавний порошок марки ПГ10Н-01. Його хімічний склад наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад твердосплавного порошку ПГ-10Н-01 (ТУ У 322-19-004-96)

Основа	Cr	B	Si	Fe	C	Твердість покриття, HRC	Розмір фракції, мкм
Ni	14–20	2,8–4,2	4,0–4,5	3,0–7,0	0,6–1,0	40-62	40-80

Для процесу наплавлення використано горючий газ, а саме суміш $[C_2H_2+O_2]$, що забезпечить необхідну температуру плавлення твердосплавного порошку. Заготовку попередньо нагрівають (300...400 °С). Після наплавлення проводимо токарну обробку композитним матеріалом. Товщина новоутвореного покриття, виміряна ультразвуковим дефектоскопом, становить 1 мм. Мікроструктура покриття наведена на рис. 4.

Якість новоутвореного покриття перевірено за допомогою міцності зчеплення ($\sigma_{зч}^c$, МПа) останнього із основою. Для цього використано штифтовий метод відриву та розривну машину.

Міцність зчеплення новоутвореного покриття із основним матеріалом (сталь 25) залежить від технологічних параметрів процесу наплавлення, а саме: тиску C_2H_2 , витрати O_2 та твердосплавного порошку. Ці технологічні параметри обрано у якості факторів варіювання для новоствореної моделі з метою пошуку їх оптимальних значень. Останні повинні забезпечити максимальне зчеплення зносостійкого покриття із основою, тому що його недостатнє значення призведе до відшаровування і, як наслідок, втрати абразивної стійкості (табл. 3).

За основу математичної моделі (залежність міцності зчеплення покриття із основою від трьох технологічних факторів) прийнято рівняння, що має наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (1)$$

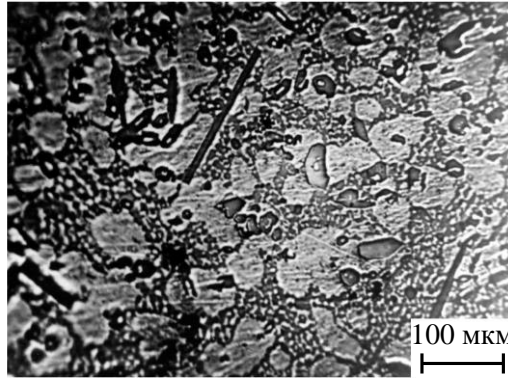


Рис. 4. Мікроструктура покриття

Таблиця 3
Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Рівні факторів	Позначення	$p_{C_2H_2}$, МПа	q_{O_2} , л/хв.	$q_{ПГ}$, г/хв.
		X_1	X_2	X_3
Верхній	+1	0,060	7,00	50,0
Основний	0	0,043	4,75	33,5
Нижній	-1	0,026	2,50	17,0
Інтервал варіювання	Δx_i	0,017	2,25	16,5

Для дослідження процесу зношування опори ковзання після наплавлення запропонована конструкція дослідного стенду (рис. 5), який імітує робочий процес.

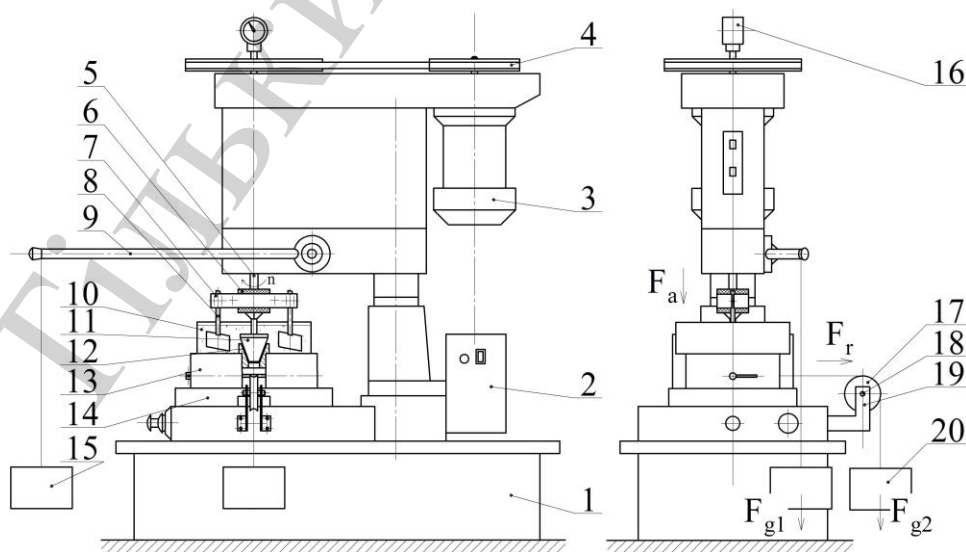


Рис. 5 Конструктивна схема дослідного стенду

Принцип його роботи дослідного стенда (рис. 5), який розташовують на нерухомій металевій основі 1, полягає в наступному. Його підключають до мережі трифазного струму через перетворювач частоти 2 (для можливості регулювання частоти обертання двигуна). Від електродвигуна 3 ($P=0,4$ кВт, $n=1320$ об/хв.) через пасову передачу 4 обертання передається на шпindel 5, на якому закріплено патрон 6. До патрона, за допомогою хомути 7 приєднано дві лопатки 8, що здійснюють обертальний рух за годинниковою стрілкою. Досліджувана пара тертя складається із вставки 12 та цапфи 11. Вставка 12 розташовується в отворі в днищі ванни 10 і затискається в лещатах 13. Останні встановлені на столі 14 із Т-подібним пазом. Цапфа 11 закріплюється у патроні 6. Ванна 10 заповнюється будівельним розчином, вмикається електродвигун 3, до важеля 9 підвішується вантаж F_{g1} 15 (моделювання осьового навантаження F_a), а до вставки – вантаж F_{g2} 20 (моделювання радіального навантаження F_r) за допомогою ролика 17, осі 18, стійки 19. Цапфа 11, обертаючись, підводиться до вставки 12. Лопатки 8 змішують будівельний розчин у ванні 10, забезпечуючи тим самим однорідність розчинної суміші, а також її підведення у зону контакту цапфи 11 зі вставкою 12. Тахометром 16 контролювалась частота обертання шпинделя дослідного стенду. Загальний вигляд дослідного стенду зображений на рис.6.



Рис. 6. Вигляд загальний дослідного стенду

Попередньо встановлено значення частоти обертання, при якій працює конічна опора, – 40 об/хв. Ця частота відповідає робочому значенню швидкості вала змішувача де й розташовуються досліджувані опори ковзання.

Для визначення величини осьового зусилля (використовувалось під час навантаження на дослідному стендові, зображеному на рис. 6) розроблена конструкція спеціального однопоршневого гідравлічного пристосування конструктивна схема якого та вигляд загальний зображено на рис. 7, 8 відповідно.

Принцип роботи пристосування наступний (рис. 7). Під час роботи в результаті виникнення осьового навантаження вал змішувача буде переміщуватись в осьовому напрямі (справа наліво). Кулька 11 почне взаємодіяти із плунжером 10, з'єднаним із поршнем 4. Останній впливатиме на робочу рідину,

якою заповнена внутрішня порожнина гільзи 2. За допомогою манометра 1 фіксується тиск, що створюється, як показано на рис. 9.

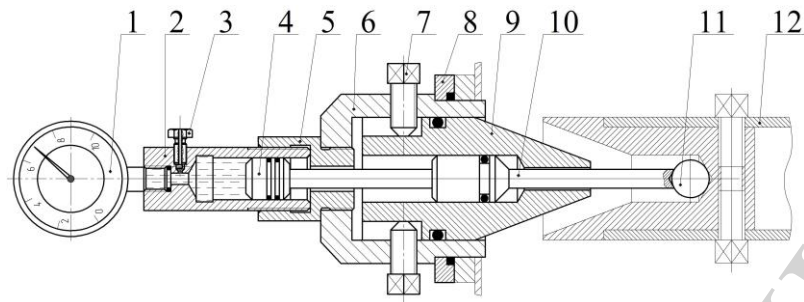


Рис. 7. Конструктивна схема пристосування: для визначення осьового навантаження: 1 – манометр; 2 – гільза; 3 – штуцер; 4 – поршень; 5 – втулка різьбова; 6 – корпус; 7 – регулювальні гвинти; 8 – фланець; 9 – цапфа; 10 – плунжер; 11 – кулька; 12 – шнековий вал



Рис. 8. Вигляд загальний пристосування для визначення осьового навантаження



Рис. 9. Визначення осьового навантаження на опору пристосуванням

Розрахунок величини осьового навантаження F_a , Н, здійснювався за формулою

$$F_a = p_m \cdot S, \quad (2)$$

де p_m – значення тиску, зафіксоване манометром, Па; S – площа поверхні поршня, м².

При збільшенні рухомості будівельної розчинної суміші (визначена за ДСТУ Б В.2.7-239:2010) вдвічі, величина осьового навантаження на опору ковзання зменшується у 2,5–3 рази [4]. Максимально можливе осьове навантаження на опору ковзання (186 Н) під час несталого режиму змішування зафіксовано для цементно-піщаного розчину складу 1:5, рухомістю 6 см, частоті обертання робочого вала 40 об/хв. і повному завантаженню розчинозмішувача. Це значення використано у якості осьового навантаження для випробувань на знос.

Величина зношування I , г, визначалася за зміною маси до і після випробувань на безважільних електронних вагах (точність вимірювання 0,001 г).

Дослідні зразки цапфи та вставки були виготовлені та загартовані зі сталей марок 45 (HRC 45...50), ХВГ (HRC 60...63), ШХ15 (HRC 62...65), а також отримані наплавленням (HRC 60...65). Твердість зразків визначено за допомогою твердоміру в умовах лабораторії. Зі сталі 45 також виготовлено зразки, що мають різне значення кута при вершині конуса (рис. 10).



Рис. 10. Дослідні зразки цапфи опори ковзання із кутом α при вершині: 30°, 35°, 40°, 45°, 50° (зліва направо)

За остаточний результат кожної серії дослідів брали середнє арифметичне значення результатів випробування п'яти пар тертя на дослідному стенді.

5 Результати досліджень підвищення абразивної стійкості опори ковзання розчинозмішувача

Для побудови математичної моделі та оцінки міцності зчеплення шару наплавленого зносостійкого покриття твердосплавного порошку ($\sigma_{зч}^r$, МПа) зі сталеву основою опори було проведено багатофакторний експеримент із вимірювання величини сили відриву штифтовим методом (див. вище). У табл. 4 наведено матрицю планування багатофакторного експерименту.

Під час проведення досліджень було визначено довірчий інтервал для кожного експерименту і проведено його порівняння із загальним розкидом значень.

Отримані коефіцієнти рівняння регресії, вагомість яких перевірена шляхом порівняння розрахункової величини критерію Стюдента із табличним значенням, занесені до табл. 5.

Таблиця 4

Матриця планування 3-ох факторного експерименту

№	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
3	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
4	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
5	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1
6	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
7	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
8	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	0	0	0	0	0
10	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	1	0	0	1	0	0	0	0
12	0	-1	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0	1	0	0	0
14	0	0	-1	0	0	1	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблиця 5

Коефіцієнти рівняння регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
44,697	0,226	0,119	0	-0,657	0,029	-0,436	-0,079	-0,041	-0,328

Підставивши коефіцієнти регресії у рівняння математичної моделі (1), отримаємо:

$$y = 44,697 + 0,226 \cdot x_1 + 0,119 \cdot x_2 - 0,657 \cdot x_1^2 + 0,029 \cdot x_2^2 - 0,436 \cdot x_3^2 - 0,079 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,041 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,328 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3)$$

Після переходу від кодованих значень до реальних, підставивши отримане до формули (3), маємо

$$y = 35,964 + 223,51 \cdot P_{C_2H_2} + 0,383 \cdot q_{O_2} + 0,156 \cdot q_{ПГ} - 2273,356 \cdot P_{C_2H_2}^2 + 0,006 \cdot q_{O_2}^2 - 0,002 \cdot q_{ПГ}^2 - 2,065 \cdot P_{C_2H_2} \cdot q_{O_2} - 0,146 \cdot P_{C_2H_2} \cdot q_{ПГ} - 0,009 \cdot q_{O_2} \cdot q_{ПГ}. \quad (4)$$

Остаточна оцінка придатності математичної моделі у вигляді функціональної залежності (4) здійснювалась за критерієм Фішера. Розрахунки показали,

що модель є адекватною. Середнє значення відносної похибки між розрахованими та експериментальними значеннями не перевищує 2,8%.

На рис. 11 наведено отримані тривимірні графічні залежності міцності зчеплення зносостійкого покриття із наплавленого твердого сплаву ПГ10Н-01 від: витрати кисню та порошку (рис. 11, а); тиску ацетилену та витрати порошку (рис. 11, б); тиску ацетилену та витрати кисню (рис. 11, в).

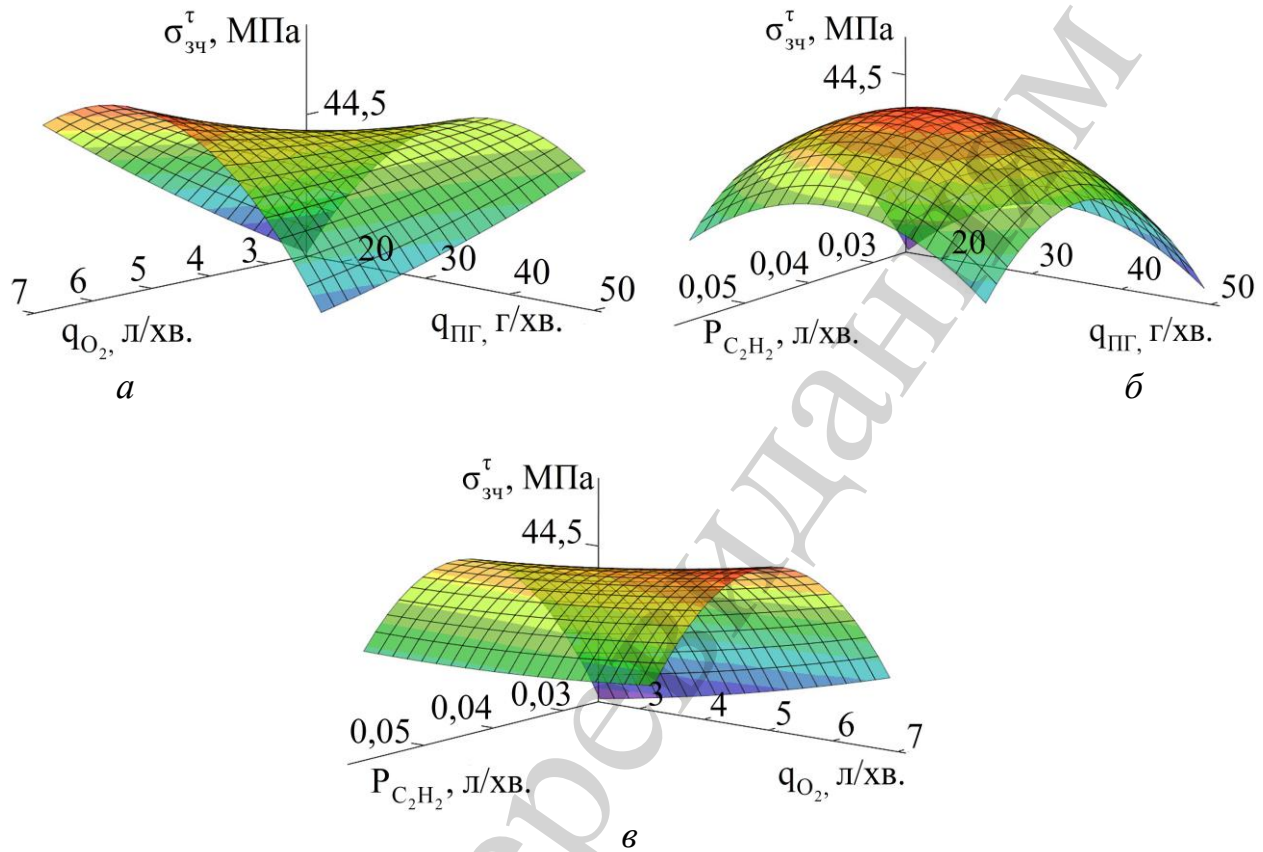


Рис. 11. Тривимірні графічні залежності міцності: а – $\sigma_{3ч}^{\tau} = f(q_{O_2}; q_{ПГ})$, $p_{C_2H_2} = 0,043$ МПа, $q_{O_2} = 2,5 \dots 7$ л/хв., $q_{ПГ} = 17 \dots 50$ г/хв.; б – $\sigma_{3ч}^{\tau} = f(p_{C_2H_2}; q_{ПГ})$, $p_{C_2H_2} = 0,026 \dots 0,060$ МПа; $q_{O_2} = 4,75$ л/хв.; $q_{ПГ} = 17 \dots 50$ г/хв.; в – $\sigma_{3ч}^{\tau} = f(p_{C_2H_2}; q_{O_2})$, $p_{C_2H_2} = 0,026 \dots 0,060$ МПа, $q_{O_2} = 2,5 \dots 7$ л/хв., $q_{ПГ} = 33,5$ г/хв.

Після випробувань на дослідному стенді (рис. 12) встановлено, що на поверхнях взаємодії цапфи із вставкою опори ковзання, що працює у абразивному середовищі (будівельна розчинна суміш) присутні риси. Вони є характерними елементами абразивного зношування. Окрім того, наявні сліди корозії. Отже, має місце абразивно-корозійне зношування, яке можна мінімізувати наплавленням твёрдосплавного покриття на основі нікелю із високою не лише абразивною, але й корозійною стійкістю.

На рис. 13 наведено результати експериментальних досліджень у вигляді графіків залежностей зношування від часу та конструктивного виконання пари тертя.



Рис. 12. Ознаки абразивно-корозійного зношування деталей пари тертя опори ковзання розчинозмішувача: *a* – вставки; *б* – цапфи

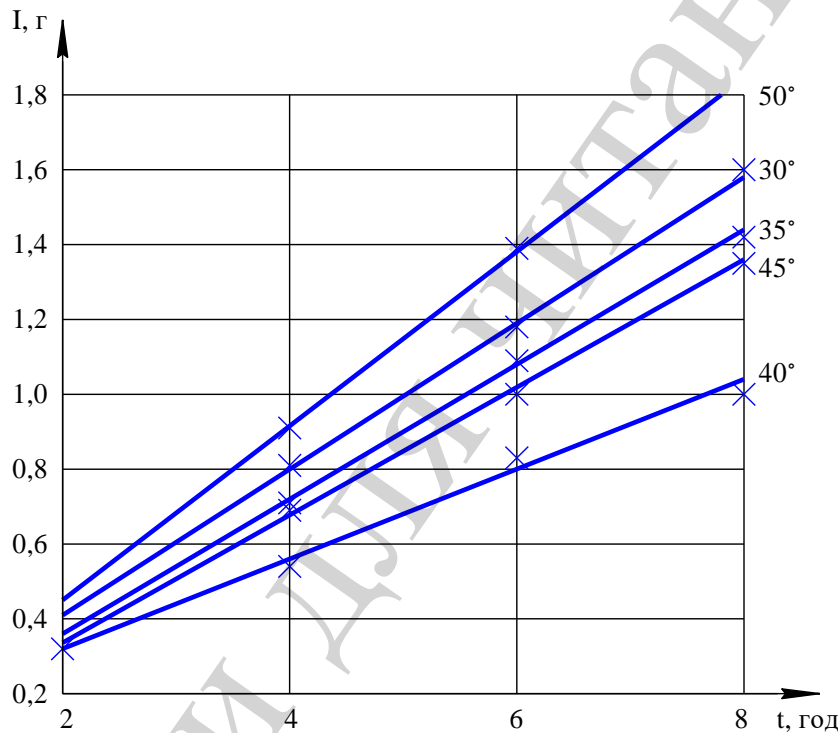


Рис. 13. Залежність величини зношування цапфи I , г, протягом часу t , год. (сумарне навантаження на опору $F_{\Sigma}=375$ Н; матеріал зразків – сталь 45; розчин цементно-піщаний 1:5; рухомість 6 см; 30°, 35°, 40°, 45°, 50° – кут при вершині конуса)

На рис. 14 наведені результати серії експериментальних досліджень щодо встановлення величини зношування пар тертя, виготовлених із різних матеріалів (45, ХВГ, ШХ15), що взаємодіють із будівельною розчинною сумішшю, із кутом при вершині конуса 40°.

Після нанесення та сталеву основу цапфи опори із кутом при вершині 40° тврдосплавного покриття на поверхні тертя при оптимальних параметрах наплавлення ($q_{III} = 33,5$ г/хв., $q_{O_2} = 7,0$ л/хв., $P_{C_2H_2} = 0,043$ МПа), за аналогією до проведеного дослідження на сталевих зразках, було проведено нову оцінку зносу (рис. 15).

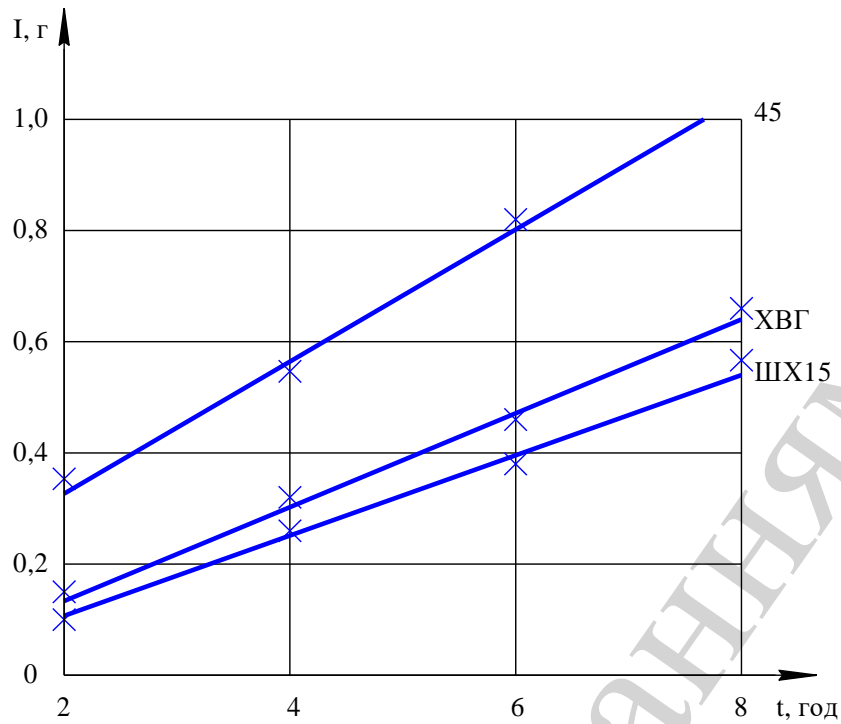


Рис. 14. Залежність величини зношування цапфи, I , г, матеріалу протягом часу t , год. (сумарне навантаження на опору $F_{\Sigma}=375$ Н, матеріал зразків – сталь 45, ХВГ, ШХ15, розчин цементно-піщаний 1:5, рухомість 6 см, кут при вершині – 40°)

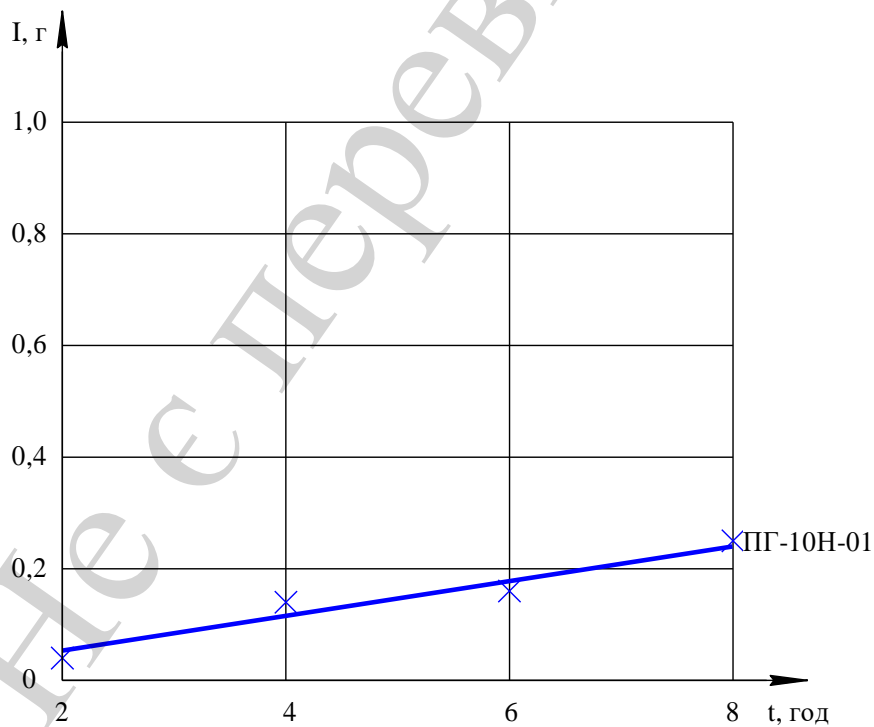


Рис. 15. Залежність величини зношування цапфи, I , г, протягом часу t , год. (сумарне навантаження на опору $F_{\Sigma}=375$ Н, матеріал поверхонь тертя – ПГ-10Н-01, розчин цементно-піщаний 1:5, рухомість 6 см, кут при вершині – 40°)

Максимум міцності зчеплення, за результатами дослідження функції (4) на екстремуми, припадає на наступні технологічні параметри: $q_{O_2} = 7$ л/хв., $q_{ПГ} = 27,29$ г/хв. (рис. 11, а); $p_{C_2H_2} = 0,046$ МПа; $q_{ПГ} = 33,37$ г/хв. (рис. 11, б); $p_{C_2H_2} = 0,045$ МПа; $q_{O_2} = 7$ л/хв. (рис. 11, в).

Застосування зносостійкого тврдосплавного покриття нанесеного методом газополуменевого наплавлення є ефективним методом суттєвого зниження величини абразивного зношування цапфи і вставки конічної опори.

6 Обговорення результатів формоутворення зовнішніх профільних поверхонь

Результатами даного дослідження є збільшення абразивної стійкості тертьових деталей опори ковзання розчинозмішувача, що підтверджується на рис. 11–13. Це досягається шляхом застосування газополуменевого наплавлення зносостійкого тврдосплавного порошку на нікелевій основі марки ПГ-10Н-01. В результаті утворюється покриття із складною структурою, в якій шари частинок наплавленого матеріалу високої твердості чергуються із оксидними прошарками. Такий характер структури є причиною високої зносостійкості наплавленого шару. Порошок наноситься на робочі поверхні цапфи і вставки, що виготовлені зі сталі 25 високої пластичності та низької вартості. Але отримані результати даного наукового дослідження є справедливими саме для конкретної пари тертя, а точніше вставки і цапфи опори ковзання, тому що вона має певні конструктивні особливості.

При дослідженні математичної моделі на визначення оптимальних параметрів нанесення тврдосплавного покриття методом газополуменевого наплавлення, було складено трьохмірні графіки для дослідження міцності зчеплення покриття з основою при парних взаємодіях факторів дослідження (рис. 11). При варіації факторів витрати кисню та порошку було виявлено, що міцність зчеплення зростає при верхньому значенні витрати кисню та середньому значенні витрати порошку в заданих межах (рис. 11, а). При варіації факторів тиску ацетилену та витрати порошку було виявлено, що міцність зчеплення зростає при виборі середніх значень тиску ацетилену та витрати порошку в заданих межах (рис. 11, б). При варіації факторів тиску ацетилену та витрати кисню було виявлено, що міцність зчеплення зростає при середньому значенні тиску ацетилену та верхньому значенні витрати кисню в заданих межах (рис. 11, в). Об'єднавши варіювання на усіх трьох графіках одночасно було виявлено, що оптимальними параметрами нанесення покриття будуть: середнє значення витрати порошку, верхнє значення витрати кисню та середнє значення тиску ацетилену, тобто $q_{ПГ} = 33,5$ г/хв.; $q_{O_2} = 7,0$ л/хв.; $p_{C_2H_2} = 0,043$ МПа. Це пояснюється максимальним значенням міцності зчеплення нанесеного зносостійкого покриття із основою у 45 МПа, що визначено штифтовим методом відриву із застосуванням розривної машини.

З рис. 13 бачимо, що кут при вершині конуса, який дорівнює 40° , забезпечує оптимальне співвідношення осьового та радіального навантажень на опору під час роботи шнекового змішувача. Це у свою чергу призводить до зменшення величини зношування. Збільшення або зменшення цього кута відносно оп-

тимального значення призведе до негативного впливу: в першому випадку – радіального навантаження, а в другому – осьового. А це вплине на підвищення величини зношування.

Показники, отримані для кулькопідшипникової сталі марки ШХ15 та інструментальної марки ХВГ є задовільними у порівнянні зі сталлю 45, тому використовувати останню для виготовлення підшипників не рекомендується (рис. 14). При швидкості ковзання 7,54 м/хв. середня інтенсивність зношування цапфи становила 0,080 г/год. – сталі ХВГ, ШХ15; 0,130 г/год. – сталі 45.

Стосовно впливу на величину зношування опори ковзання типу будівельної розчинної суміші та її рухомості необхідно відмітити таке. Попередніми дослідженнями [4] встановлено, що зі збільшенням рухомості розчину й переходом від цементно-піщаних та складних розчинів до вапняно-піщаних, значення величини споживаної приводом потужності зменшується. Це призведе до зменшення в даному випадку величини обертового моменту і сумарного навантаження. Отже, зношування опори ковзання буде зменшуватись, а її довговічність підвищуватись.

При швидкості ковзання 7,54 м/хв. (рис.15) середня інтенсивність зношування цапфи становила 0,032 г/год. для тврдосплавного покриття ПГ-10Н-01, що приблизно в 2,5 рази краще, ніж для ШХ15 або ХВГ.

Слід зазначити, що дослідження виконувалось для деталей підшипникової опори розчинозмішувача (вставка і цапфа), виготовлених зі сталі 25 з подальшим газополумєневим наплавленням тврдосплавного порошку на основі нікелю марки ПГ10Н-01. Опора використовується у корпусі реверсивного шнекового змішувача, що обертається із постійною частотою 40 об/хв. Під час роботи вставка і цапфа контактують між собою та робочим середовищем, яким є будівельна розчинна суміш.

Перспективним напрямом покращення зносостійкості опори ковзання є застосування технології не газополумєневого наплавлення, а оплавлення [1]. Сутність останньої полягає не в напавленні, в оплавленні пальником зносостійкого матеріалу, який попередньо вже був нанесений на поверхні тертьових деталей цапфи і вставки опори. Це дасть можливість уникнути розбрикування розплавленого порошку, яким характеризується напавлення, спростити конструкцію пальника. Але запропонована технологія вимагає проведення подальших наукових досліджень, що дозволять перевірити міцність зчеплення тепер вже оплавленого матеріалу із основою, а також знайти оптимальні режими технологічного процесу.

7 Висновки

1. Розроблена математична модель у вигляді функціональної залежності, що адекватно описує технологічний процес газополумєневого напавлення. При парній взаємодії факторів побудовані тривимірні графічні залежності міцності зчеплення зносостійкого покриття цапфи і вставки опори ковзання від технологічних параметрів.

2. За допомогою дослідного стенда на базі настільного вертикально-свердлильного верстата було змодельовано процес зношування опори ковзання

у абразивному середовищі під дією прикладених навантажень. Наявні характерні ознаки абразивно-корозійного зношування цапфи та вставки опори.

3. Запропонована методика, що дозволила визначити величину осьового навантаження, яке зазнає опора. Воно становить 186 Н.

4. Серія експериментальних досліджень засвідчила, що найкращим варіантом конструктивного виконання цапфи і вставки є кут при вершині 40° . Створення зносостійкого покриття на основі твёрдосплавного порошку ПГ-10Н-01 забезпечує відмінні показники зносостійкості. Вони перевищують аналогічні для сталі ШХ15 приблизно у 2,5 рази.

5. Визначено оптимальні параметри технологічного процесу газополуменевого наплавлення, що забезпечують максимальне значення міцності зчеплення новоутвореного зносостійкого покриття із основою у 45 МПа, а саме: витрата порошку – 33,5 г/хв.; витрата кисню – 7,0 л/хв.; тиск ацетилену – 0,043 МПа.

Література

1. Білецький, В. С. (Ред.) (2004). Мала гірнича енциклопедія. Донецьк: Східний видавничий дім, 640.
2. Онищенко, О. Г., Попов, С. В. (2005). Регульовані конічні підшипники ковзання мобільної розчинозмішувальної установки УРЗ-3,8. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 6 (1 (18)), 45–47.
3. Онищенко, О. Г., Ващенко, К. М., Попов, С. В. (2007). Перспективи використання розчинозмішувальної установки УРЗ-3,8 на будівельних майданчиках України. Современные проблемы строительства. Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, 138–144.
4. Kravchenko, S., Popov, S., Gnitko, S. (2016). The working pressure research of piston pump RN-3.8. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (1 (83)), 15–20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80626>
5. Попов, С. В., Васильев, А. В., Леднік, Р. А. (2015). Теоретичне дослідження зносу конічного підшипника ковзання. Технологический аудит и резервы производства, 2 (1 (22)), 60–64. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.41395>
6. Kaplun, P., Gonchar, V., Bodnar, R. (2013). Enhancement of steel wear resistance in corrosive and abrasive medium. Interdisciplinary integration of science in technology, education and economy. Bydgoszcz-Poland, 320–329.
7. Sobolev, V. V., Guilemany, J. M., Miguel, J. R., Calero, J. A. (1996). Influence of in-flight dissolution process on composite powder particle (WC-Ni) behaviour during high velocity oxy-fuel spraying. Surface and Coatings Technology, 81 (2-3), 136–145. doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02481-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02481-6)
8. Sobolev, V. V., Guilemany, J. M., Miguel, J. R., Calero, J. A. (1996). Influence of thermal processes on coating formation during high velocity oxy-fuel (HVOF) spraying of WC-Ni powder particles. Surface and Coatings Technology, 82 (1-2), 121–129. doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02657-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02657-6)
9. Shrestha, S., Hodgkiess, T., Neville, A. (2005). Erosion–corrosion behaviour of high-velocity oxy-fuel Ni–Cr–Mo–Si–B coatings under high-velocity seawater jet impingement. Wear, 259 (1-6), 208–218. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.038>

10. Dent, A. H., Horlock, A. J., McCartney, D. G., Harris, S. J. (2001). Microstructural characterisation of a Ni-Cr-B-C based alloy coating produced by high velocity oxy-fuel thermal spraying. *Surface and Coatings Technology*, 139 (2-3), 244–250. doi: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)00996-3](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(01)00996-3)
11. Sang, K., Li, Y. (1995). Cavitation erosion of flame spray weld coating of nickel-base alloy powder. *Wear*, 189 (1-2), 20–24. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06608-x](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06608-x)
12. Huang, F., Xu, H., Liu, W., Zheng, S. (2018). Microscopic characteristics and properties of titaniferous compound reinforced nickel-based wear-resisting layer via in situ precipitation of plasma spray welding. *Ceramics International*, 44 (6), 7088–7097. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.148>
13. Janka, L., Berger, L.-M., Norpoth, J., Trache, R., Thiele, S., Tomastik, C. et. al. (2018). Improving the high temperature abrasion resistance of thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings by WC addition. *Surface and Coatings Technology*, 337, 296–305. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.035>
14. Kazasidis, M., Yin, S., Cassidy, J., Volkov-Husović, T., Vlahović, M., Martinović, S. et. al. (2020). Microstructure and cavitation erosion performance of nickel-Inconel 718 composite coatings produced with cold spray. *Surface and Coatings Technology*, 382, 125195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125195>