

АСПЕКТИ ВИКЛАДАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ ДИСЦИПЛІН НА ПРИКЛАДІ ВПРОВАДЖЕННЯ В УЧБОВИЙ ПРОЦЕС РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ І ЯКОСТІ ЗМІЦНЮЮЧИХ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ ПОКРИТТІВ

Дерябкіна Є. С.

ВСТУП

У сучасну епоху освіта стала однією з найширших сфер людської діяльності. Істотно підвищилася соціальна роль освіти: від її спрямованості та ефективності сьогодні багато в чому залежать перспективи розвитку людства. Освіта, особливо вища, розглядається як головний, провідний фактор соціального та економічного прогресу¹.

Проблеми вдосконалення вищої освіти, підвищення якості професійної підготовки фахівців є одними з важливих завдань у розвитку суспільства. Об'єктивний процес сучасного економічного та розвитку країни висуває нові критерії якості освіти. Організація навчання у вищій школі направлена на підготовку спеціалістів, що володіють теоретичними знаннями і практичними навичками, покликаних вирішувати інженерні проблеми в тій чи інших галузях техніки і технології. При підготовці спеціалістів до інженерної діяльності у якості об'єкту навчання виступає техніка і технологія, а функціональна структура діяльності визначається як проектування, організація і технічне здійснення інженерних розробок. Організація навчання базується на системному підході, який є всеохопним і об'єднує різноманіття відомих та перспективних знань і факторів в єдину систему навчання т. б. систему наукових знань, вмінь і навичок, світоглядних питань. Розвиток комунікацій у ВНЗ створює умови для забезпечення якісного навчання. Комунікаційний підхід успішно використовується в науковому і навчально-виховному процесі вищих навчальних закладів України, проте потребує актуалізації в сучасних умовах їх функціонування².

¹ Дергоусова А. О., Романович Є. В. Формування стратегії комунікації для закладу вищої освіти. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: «Економічні науки»*. 2019. № 10 (30). С. 60–65. DOI: 10.25313/2520-2294-2019-10-5273

² Грищенко І.М., Крахмальова Н.А. Інструменти та форми маркетингової комунікації на ринку освітніх послуг. *Ефективність організаційно-економічного механізму інноваційного розвитку вищої освіти України*. Київ: Вісник КНУТД. 2012. № 4. С. 298–307.

Ведучим питанням є висвітлення закономірностей, які використовує сучасна педагогічна наука при проектуванні навчального процесу, формуванні вмінь і навиків студентів – магістрів інженерних спеціальностей і реалізації системного підходу до їх підготовки, особливо при вивченні фахових дисциплін. Зв'язок теорії з практикою, практичного досвіду з наукою підвищують ефективність навчального процесу. При викладанні дисциплін використовуються поєднання видів навчальної роботи з методами та формами активізації пізнавальної діяльності студентів для досягнення запланованих результатів навчання та формування відповідних компетентностей.

Так для підготовки студентів в галузі сервісної інженерії, впровадження результатів наукових досліджень за темою «Розробка та впровадження технологічних процесів виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин з метою підвищення експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності технічних об'єктів»³, що проводяться на кафедрі Сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні Державного біотехнологічного університету, в учбовий процес викладання фахових дисциплін сприяють усуненню протиріч між освітою і наукою та є дієвим прикладом впровадження інновацій в навчальний процес.

Таким чином, стан, проблеми та результати досліджень у галузі технічних наук і педагогічні аспекти їх відображення при викладанні інженерних дисциплін, на сам перед спрямовані на забезпечення та підтримку конкурентності в галузі освоєння передових технологій сучасного машинобудування.

1. Виникнення передумов проблеми та формулювання проблеми

Існує гостра необхідність у забезпеченні високого рівня зносостійкості та довговічності деталей і вузлів, що підлягають ремонту в експлуатаційних умовах. Вирішення цих завдань для транспортної техніки, насамперед, залежить від удосконалення процесу ремонту за рахунок впровадження прогресивних методів відновлення та зміцнення деталей з урахуванням їх конструктивно-технологічних особливостей, скорочення термінів ремонту, економії матеріалів та зниження трудомісткості, впровадження нових ресурсозберігаючих технологій та обладнання, що дозволяють вирішувати експлуатаційні

³ Звіт про науково-дослідну роботу "Розробка та впровадження технологічних процесів виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин з метою підвищення експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності технічних об'єктів"/ А.К. Автухов, О.Ю. Клочко та ін. Харків: ДБТУ, 2023. 138 с. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/54292/1/ZVIT_Avtukhov_Klochko.pdf

завдання з науковою обґрунтованістю і техніко-економічною доцільністю. Однак технічне забезпечення підприємств, засноване на широкому використанні традиційних методів ремонту, незважаючи на їх постійне вдосконалення, не відповідає сучасним вимогам, і в багатьох випадках термін служби відновлених деталей залишається низьким, що призводить до зниження їх безпечної експлуатації⁴.

Таким чином, розробка та широке впровадження – прогресивних способів газотермічного напилювання, зокрема газополуменового, з отриманням на робочих поверхнях деталей експлуатаційного шару з попередньо заданими фізико-механічними характеристиками, що забезпечують оптимальні умови експлуатації, повинні стати основним напрямом роботи у питанні підвищення термінів служби деталей засобів транспорту під час їхньої постановки на виробництво⁵. Проте якість газополуменових покриттів не завжди відповідає підвищеним вимогам, що висуваються до деталей машин при експлуатації в умовах інтенсивних динамічних навантажень. Широкому застосуванню газополуменового напилювання перешкоджає низька адгезійно – когезійна міцність нанесених покриттів і їх висока пористість. Дослідження газополуменового напилювання спрямовані на раціональне активування процесу нанесення покриттів шляхом його інтегрування з іншими технологіями – підвищити якість покриттів можливо шляхом поєднання технології напилювання з механічною обробкою щітковим інструментом.

Незважаючи на велику кількість розробок у галузі підвищення міцності зчеплення та зниження пористості напилених покриттів, дослідження розвиваються активно і в даний час, причому вони набули спрямованості на вдосконалення процесу або подальше його модифікування. Одним з найбільш прогресивних напрямів підвищення якості газотермічних покриттів, що напилюються, є розробка інтегрованих технологій, які безсумнівно дозволяють знизити витрати праці та енергії, підвищити ефективність процесу відновлення за рахунок суміщення або комбінування напилювання з іншими зміцнюючими технологіями.

Відсутність науково-технічної інформації про вплив інтегрованого газополуменового способу відновлення на властивості покриттів в процесі експлуатації, відсутність рекомендацій по вибору оптимальних параметрів щіткової обробки робить завдання дослідження актуальним. Рішення цих завдань, на основі аналізу і дослідження

⁴ Ремонт машин та обладнання: підручник / О.А. Науменко, Т.С. Скобло та ін.; за ред. О.І. Сідашенка; передм. О.І. Сідашенка. Київ, 2014. 665 с.

⁵ Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International, 2004. P. 338. URL: <https://books.google.com.ua> (дата звернення 21.06.2024).

основних закономірностей формування поверхні при відновленні, дозволить ефективно управляти якістю зміцнених деталей.

2. Аналіз існуючих методів вирішення проблеми

Основним параметром, що визначає якість напиленого покриття, є міцність зчеплення з основою, що забезпечується на 90% адгезією і приблизно на 10% частковою дифузією. Адгезія покриттів до металу основи пов'язана із контактною активністю останніх. Прикріплення покриття, що напилюють, до основного матеріалу здійснюється, насамперед, за допомогою зв'язку від взаємної передачі валентних електронів, а також за допомогою локального дифузійного і металургійного зв'язку⁶. Для створення необхідного прикріплення покриття його частка повинна подолати певну енергію потенційного поля кристалічних ґрат (яку можна знизити шляхом механічної підготовки поверхні замість традиційної абразиво-струйної обробки). Підвищення міцності зчеплення досягається за рахунок збільшення площі взаємодії часток з основою і анкерного зачеплення розплавлених частинок з мікронерівностями шляхом штучного формування шорсткості на поверхні основи. Підготовка поверхні перед напилюванням забезпечує її очищення і виводить її зі стану термодинамічної рівноваги, звільняючи міжатомні зв'язки поверхневих атомів, тобто хімічно активує підкладку. Проте активність підкладки швидко знижується через хімічну адсорбцію газів і окислення, тому час між операціями підготовки поверхонь та нанесенням покриттів необхідно максимально скорочувати.

Вирішення цього завдання на основі аналізу та дослідження основних закономірностей формування поверхні деталей під нанесення покриттів дозволить ефективно керувати якістю зміцнених деталей.

Активізації поверхні металу механічною обробкою металевими щітками підтверджується теоретичними дослідженнями про дислокаційні процеси при різанні металів. Авторами роботи встановлено, що в енергетичному балансі процесу різання більше 90% приходить на пластичну деформацію матеріалу оброблюваної деталі. Тому прийнято вважати процес різання процесом превалюючого пластичного деформування з високою швидкістю (10^3 – 10^6 м·с⁻¹) і великими тисками на поверхню металу, що обробляється (до 2ГПа), високою температурою,

⁶ Сокур Т.Д., Попіль Ю.С., Корж В.М. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку газотермічних способів нанесення покриття. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут. Серія Машинобудування*. 2011. № 61. С. 168–171. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/4961/3/168.1.pdf>

градієнтом напруг і деформацій⁷. Механізм деформаційного зміцнення і характер протікання пластичної деформації впливають на точність, шорсткість та якість поверхневого шару основи. Дислокації починають рухатися під дією зовнішніх сил, першими рухаються дислокації системи ковзання, в яких дотичні напруження максимальні. Пластичний перебіг відбувається, коли дотичні напруження досягають критичної зсувної напруги, близької до межі плинності⁸. Найбільшої величини навантаження, що діють, досягають на поверхнях металевих деталей у місцях контакту з ріжучим інструментом.

Розподіл енергії пластичної деформації у зоні обробки ворсинками металеві щітки можна представити так:

$$Q = Q_n + Q_n, \quad (1)$$

де Q_n – енергія, що витрачається на пластичну деформацію поверхневого шару під обробленою поверхнею, Q_n – енергія, що витрачається на утворення та видалення наросту.

Енергія пластичної деформації поверхневого шару визначається по формулі:

$$Q_n = (U_c + U_d) \cdot S, \quad (2)$$

де U_c – прихована енергія деформування одиниці площі обробленої поверхні; U_d – енергія руху дислокацій, віднесена до одиниці площі обробленої поверхні; S – площа обробленої поверхні.

Прихована енергія деформації пов'язана з дислокаційним механізмом зародження дислокацій. З кожною дислокацією пов'язана енергія пружних спотворень, що відповідає роботі, витраченої на її утворення. В свою чергу енергія, що витрачається на утворення наросту, визначається по формулі:

$$Q_n = (\tilde{U}_c + \tilde{U}_d) \cdot \tilde{S}, \quad (3)$$

де \tilde{U}_c – прихована енергія деформування наросту, що утворюється, віднесена до одиниці площі обробленої поверхні; \tilde{U}_d – енергія руху дислокацій, віднесена до одиниці площі утвореного наросту; \tilde{S} – площа основи наросту.

Поточне значення прихованої енергії деформування у процесі обробки завжди перевищує її значення після припинення дії. Це пояснюється тим, що частина дислокацій і вакансій анігілює,

⁷ Грицай І.С., Кукляк М.Л. Різання металів: навч. посібник. Львів, 2005. 132 с.

⁸ Основи теорії різання матеріалів / Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога та ін.; за заг. ред. М.П. Мазура; 2-е вид. перероб. і доп. Львів, 2011. 422 с.

а енергія дислокацій, що залишилися, може істотно зменшитися в результаті дисипації її при русі. Енергія, що звільняється, виділяється у вигляді тепла.

При пластичній деформації металу підвищується його температура, оскільки більшість роботи деформації перетворюється на тепло. Фізична природа нагріву при пластичній деформації пов'язана з розсіюванням пружної енергії коливань дислокаціями при їх русі в полі внутрішніх напруг, утворених іншими дислокаціями, а також різними перешкодами. Рухаючись у металі, дислокація долає область високої внутрішньої напруги і потрапляє в область їх мінімуму, вона може швидко коливатися, зміщуючись вперед і назад під дією зовнішніх і внутрішніх напруг. В результаті кінетична енергія дислокації, що коливається, буде розсіюватися в околиці площини ковзання, що призводить до збільшення амплітуди коливань решітки і відповідно до підвищення температури. Отже, енергія руху дислокацій повністю перетворюється на тепло. Частина енергії, що витрачається у процесі деформації на зародження нових дислокацій, внаслідок анігіляції при зіткненні дислокацій протилежних знаків та перерозподілу у стійкі конфігурації також виділяється у вигляді тепла. На основі вищенаведених теоретичних можна побудувати дислокаційно – енергетичну модель розподілу енергії, що передається металу у процесі обробки металевою щіткою (рис. 1)⁹.

Таким чином, щіткова обробка виводить поверхню, що обробляється, зі стану термодинамічної рівноваги з середовищем, звільняючи міжатомні зв'язки поверхневих атомів, підвищує сумарну площу приварювання за рахунок створення необхідної шорсткості, що сприяє здійсненню контактних процесів, створенню наклепу.

Процес мікрорізання здійснюється різальними інструментами – голками металевої щітки (рис. 2).

Імовірно, перші дислокації зароджуються з поверхневих джерел типу Франка – Ріда або Фішера. Нові дислокації, що утворилися, зміцнюють матеріал і підвищують його фізико-механічні характеристики¹⁰. Збільшення щільності дислокацій у металі сприяє підвищенню його твердості, яка у деформованому тілі пропорційна середній напрузі, що виникає в процесі деформації. В свою чергу, з теорії виходить, що напруження деформації при різних механізмах зміцнення пропорційна

⁹ Лузан С.О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей: курс лекцій. Харків: ХНТУСГ, 2020. 127 с.

¹⁰ Резніченко М.К., Резніченко О.М., Дерябкіна Є.С. Дослідження роботи і підвищення несучої здатності монорельсового шляху при змінному навантаженні. *Наука і техніка сьогодні*. 2022. Вип. 9. (9). С. 10–18.



Рис. 1. Схема дислокаційно-енергетичної моделі розподілу енергії, що передається металу в процесі обробки металевою щіткою

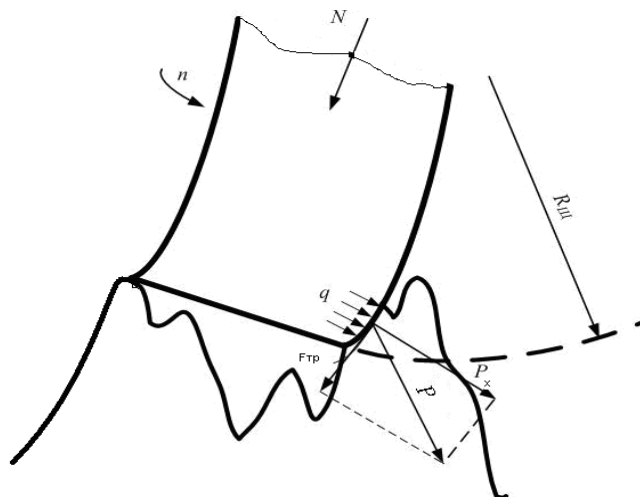


Рис. 2. Схема утворення подряпини: N – навантаження притиснення голки; $R_{щ}$ – радіус щітки; n – обороти обертання щітки; q – питоме навантаження, що передається голкою поверхні металу; $F_{тр}$ – сила тертя голки о мікрориступ; P_x – напруга, що сколює

квадратному кореню зі щільності дислокацій. Від щільності та характеру розподілу дислокацій залежить рівень залишкових напружень, величина прихованої енергії в обробленому матеріалі й інші характеристики якості поверхневого шару. Відповідно твердість зміцненого металу HV і міра наклепу Z можуть бути безпосередньо пов'язані зі щільністю дислокацій:

$$HV = \frac{Gb}{K} \sqrt{\rho}, \quad Z = \frac{HV - HV_{вих}}{HV_{вих}} = \frac{K_{вих}}{K} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{вих}}} - 1, \quad (4)$$

де G – модуль зрушення; b – вектор Бюргерса; ρ – щільність дислокацій, K – коефіцієнт, що залежить від модулів пружності та зсуву і характеризує розподіл зміщення форми ліній та величини кристалів.

Проведені теоретичні дослідження є обґрунтуванням застосування механічної обробки щітковим інструментом для активації поверхні металу замість традиційної абразиво – струменевої обробки.

Запропоновано спосіб газополуменового нанесення покриттів інтегрованого з щітковою обробкою, яка використовується для під час формування шарів напилюваного покриття для видалення окисних плівок і часток з низькою когезійною міцністю в покритті та як найбільш перспективний спосіб механічної обробки поверхні під напилювання, що забезпечує її активізацію і отримання необхідної шорсткості. Схема процесу наведена на рис. 3¹¹.

Суть пропонованого способу полягає в наступному: поверхню деталі (3) під напилювання, обробляють металевою щіткою (5) з радіально закріпленим металевим ворсом, яка обертається електродвигуном. Газополуменим пальником (1) утворюється спрямований потік (7) дисперсних часток порошкового напилюваного матеріалу і забезпечується їх перенесення на поверхню деталі, що обертається, для формування покриття (8). Шари покриття в процесі формування обробляються щіткою (5), що обертається. Спеціальна металева щітка розташовується на діаметрально протилежній по відношенню до пальника стороні деталі. Підтискання щітки до деталі виконується спеціальним пристроєм (6), механізм (4) забезпечує подовжнє переміщення щітки відносно деталі.

¹¹ Спосіб напилювання газотермічного порошкового покриття: пат. 44994 Україна: МПК 2 C23C4/00; № u200904703; заявл. 12.05. 09; опубл. 12.10.09, Бюл. № 19. 3 с.

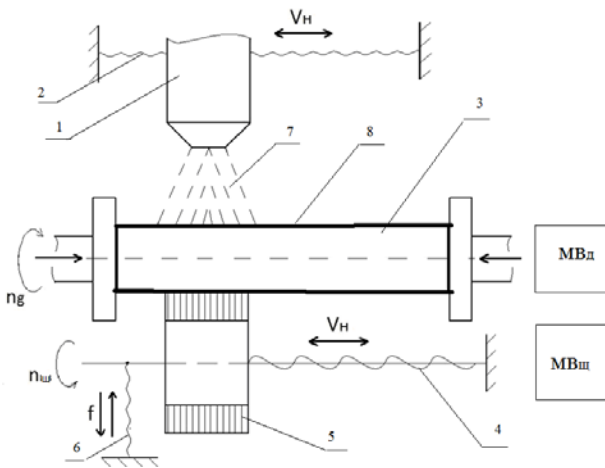


Рис. 3. Схема інтегрованого способу нанесення покриттів

При виконанні роботи використані наукові основи технології різання, фундаментальні фізичні представлення основ тертя, математичне моделювання, методи математичної статистики при дослідженні показників якості відновлювальних покриттів; математична обробка експериментальних даних.

При проведенні досліджень застосовувалися методи: металографічний і мікрорентгеноспектральний, оцінки шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень, міцності зчеплення з основою, зносостійкості. Достовірність результатів досліджень підтверджується задовільним збігом величин, отриманих на базі математичної моделі, з результатами експериментальних досліджень і виробничих випробувань.

3. Особливості нанесення зміцнюючих покриттів інтегрованим газополумєним напилюванням

На основі теоретичної оцінки процесів, які протікають у зоні обробки щіткою інструментом встановлено, що конструктивно-технологічні параметри щітки впливають на адгезійну і когезійну міцність напиленого покриття. Режими щіткової обробки різко відрізняються від режимів абразивної обробки – швидкість обертання в 5-10 разів менша, а зусилля притискання та різання більші.

На підставі попередньо проведеної серії експериментів визначено параметри щітки, що забезпечили необхідну шорсткість: діаметр щітки 150 мм, ширина робочої поверхні 26 мм, діаметр голок 0,8 мм, вільна довжина голок 40 мм, щільність набивання голок 32 шт/см².

Оброблення проводили при натягу N – від 1 до 4 (з кроком 0,5) мм і швидкості обертання щітки n від 60 до 200 об/хв (з кроком 20). Такий вибір параметрів пояснюється тим, що за попередніми експериментами шорсткість поверхні основи та міцність зчеплення збільшуються зі збільшенням діаметра голок та швидкості обертання щітки, діаметр голок менше 0,35 мм не забезпечує необхідний рівень шорсткості та міцність зчеплення покриття з основою зі сталі 45. Діаметр голок вибирається в залежності від необхідної шорсткості поверхні, причому встановлено, що щітки з меншим діаметром голок забезпечують меншу шорсткість поверхні, але є більш продуктивними. Зі збільшенням швидкості обертання щітки міцність зчеплення збільшується, причому в інтервалі оборотів від 100 до 200 об/хв більш інтенсивно, а при оборотах 160-210 об/хв – досягає максимуму, після чого починає трохи знижуватися. Можливо припустити, що це пояснюється тим, що відбувається зализування шарів металу при загинанні голок.

В результаті апроксимації експериментальної залежності отримана поліноміальна функція:

$$y = -4 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,0181x + 5,4298, \quad (5)$$

при коефіцієнті кореляції $R^2=0,9792$.

Отримана залежність (5) є рівнянням прогнозування міцності зчеплення напиленого покриття з основою в залежності від швидкості обертання щітки (рис.3). Можна припустити, що максимальна міцність зчеплення обмежується величиною когезійної міцності покриття. У свою чергу шорсткість поверхні основи залежить від швидкості обертання щітки. Технологічні можливості процесу щіткової обробки дозволили отримати необхідну шорсткість поверхні $R_a = 9-12$ (при абразивоструйній обробці $R_a = 6-7$ мкм), швидкість обертання щітки 100–200 об/хв (лінійна швидкість 47–94 м/хв), час підготовки поверхні деталі становить 5–6 хв (згідно з даними експерименту).

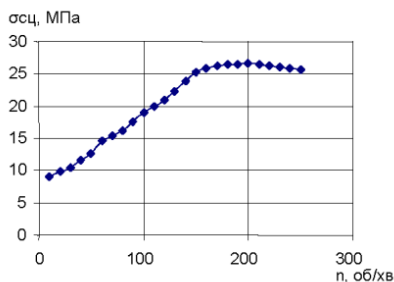


Рис. 4. Залежність міцності зчеплення від швидкості обертання щітки

Адгезії покриття з основою скла – 20 МПа – при абразивоструйній обробці поверхні; 25,6 МПа – при щіткової обробці поверхні. Щіткова обробка очищує поверхню від забруднень, руйнує окисну плівку, що утворюється на поверхні основного металу. Дослідження довели доцільність застосування щіткової обробки для підготовки поверхні, причому змінюючи швидкість обертання щітки, можна отримати регламентовану мікротопографію поверхні (рис. 5 та формула 6).

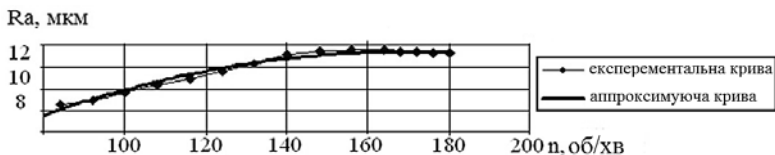


Рис. 5. Залежність шорсткості поверхні від кількості обертів

$$R_a = -1 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,0051n + 1,6059, \text{ при } K = 0,9791 \quad (6)$$

З аналізу експериментальної кривої видно, що зі збільшенням числа обертів шорсткість оброблюваної поверхні збільшується аж до насичення при оборотах 150+10 об/хв і потім дещо знижується, що можна пояснити зменшенням глибини проникнення голок в оброблювану поверхню.

Враховуючи характер апроксимуючих кривих, які є поліноміальними функціями другого ступеню, були проведені дослідження, спрямовані на оптимізацію основних параметрів щіткової обробки поверхні під напилення. Для оцінки мікротопографії поверхні і визначення оптимальних параметрів щіткової обробки для отримання регламентованої шорсткості поверхні проводилися порівняльні дослідження по двом режимам (табл. 1)¹²

Таблиця 1

Режими механічної обробки щітковим інструментом

| Режим | d _ш , мм | N, мм | R, мм | l _ш , мм | n _ш , об/хв | P, шт/см ² | V _{под} , м/с |
|------------|---------------------|-------|-------|---------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| «М'який» | 0,35 | 0,5 | 150 | 60 | 60 | 20 | 1 |
| «Жорсткий» | 0,8 | 3,00 | 150 | 30 | 150 | 40 | 1 |

¹² Дерябкина Е. С. Оптимізація параметрів обробки поверхні деталей під напилювання відновних покриттів. *Машинобудування*. 2017. № 20. С. 77–84.

Обробка на «м'якому» режимі забезпечила отримання шорсткості мінімального рівня: $R_a = 5,9$; $R_z = 31,0$; $R_t = 40,1$ мкм, обробка на «жорсткому» режимі – максимальну шорсткість: $R_a = 11,89$; $R_z = 68,7$; $R_t = 86,0$ мкм.

Оцінку шорсткості поверхні оцінювали наступними параметрами R_a , R_t , RS_m , R_z , R_{mr} (згідно ISO 9000-1997). Параметри визначалися на профілографі – профілометрі Taylor/Hobson. Вимірювання проводили по поверхні відносної опорної довжини (L) – 20 мм, базова довжина – 0,8 мм. При застосуванні «жорсткою» обробки відмічено збільшення висотних параметрів R_a , R_t , R_z , а похилі параметри Q_a – середнє арифметичне значення кута нахилу профілю і Q_q – середнє квадратичне значення кута нахилу профілю залишаються незмінними. Значення S_m вказують на те, що при постійних Q_a , Q_q нерівності стають більшими і протяжнішими, спостерігається фіксація ефекту відтискання матеріалу під час жорсткої обробки. Цей ефект характеризується зростанням параметрів R_a , R_t , R_z у зоні контакту напрямку руху щітки. Результати даного дослідження можна використовувати для розробки технології отримання регламентованої мікротопографії поверхні деталей.

Встановлено, що збільшення d_i (при $l_i = \text{const}$) призводить до зростання шорсткості оброблюємої поверхні, проте зі збільшенням натягу шорсткість поверхонь, оброблених інструментами з різним діаметром голок, зменшується. Це пояснюється зростанням пластичних деформацій. На вибір вільної довжини голок впливає вибір натягу. Зі збільшенням натягу при збільшенні довжини голок знижується ефективність обробки поверхні, так як це призводить до зростання напружень вигину у голках.

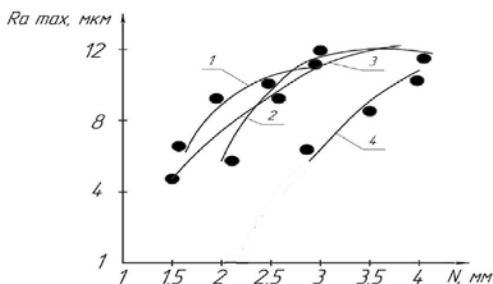


Рис. 7. Вплив натягу на висоту мікронерівностей R_a при різних d_i і l_i голок ($n=150$ об/мин, $S = 1$ мм): 1 – $d_i = 0,5$ мм; $l_i = 20$ мм; $p = 20$ шт/см²; 2 – $d_i = 0,5$ мм; $l_i = 40$ мм; $p = 20$ шт/см²; 3 – $d_i = 0,8$ мм; $l_i = 40$ мм; $p = 30$ шт/см²; 4 – $d_i = 0,8$ мм; $l_i = 60$ мм; $p = 30$ шт/см².

Поряд з цим, при рівних натягах (рис. 7, криві 1 і 2) щітка з більшою довжиною голок забезпечує отримання меншої шорсткості поверхні, що пояснюється збільшенням мікрОВИГЛАДЖУВАННЯМ в загальному процесі різання та зменшенням глибини проникнення в результаті зростання величини притискання голок. Мінімум шорсткості спостерігається при $n = 200$ об/хв. Зазначений характер залежності $R_a = f(n)$ пояснюється тим, що зі зростанням швидкості обробки, внаслідок віджимання голок зменшується їх впровадження в оброблювану поверхню. Це призводить до зниження шорсткості, а подальше незначне зростання шорсткості пояснюється збільшенням пластичних деформацій на окремих ділянках металевої основи. Зі збільшенням щільності розташування голок шорсткість спочатку зростає, а потім трохи знижується. Можна пояснити це тим, що зі збільшенням натягу зменшується кількість голок, які контактують з одиницею площі. Зі збільшенням натягу шорсткість поверхні зростає внаслідок збільшення глибини проникнення голок. Збільшення натягу понад оптимальні значення призводить до зменшення глибини проникнення голок. Враховуючи те, що характер мікрорельєфу, отриманий щітковою обробкою, залишається тим самим при зміні параметрів процесу, можна вважати, що якісно картина формування шорсткості поверхні відображена правильно.

Правильний вибір сукупності технологічних параметрів відіграє важливу роль отримання якісних покриттів. Сучасні експериментально – статистичні методи планування та аналізу експерименту ефективні щодо складних багатофакторних процесів, потребують значних матеріальних витрат і тривалих термінів. Метою планування експерименту при розробці інтегрованого процесу газополум'яного відновлення є визначення оптимальних параметрів щіткової обробки для забезпечення підвищення міцності зчеплення покриття з основою як одного з основних факторів, що визначають його якість. Такими параметрами обрані: x_1 – діаметр голок щітки (мм), що обертається, x_2 – вільна довжина голок (мм), x_3 – швидкість обертання щітки (об / хв), x_4 – щільність розташування голок (шт / см^2)¹³.

Так як необхідно знайти оптимальні значення факторів, то область оптимуму повинна описуватися як мінімум рівнянням другого порядку:

¹³ Дерябкіна Є.С., Нефьодов А.І. Голкофрезерування як спосіб підготовки поверхні під нанесення покриттів. *Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XIX міжнар. форуму молоді* (Харків, 17–18 травня 2023р.). Харків: ДБТУ, 2023. С. 133.

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2. \quad (7)$$

Для отримання математичної моделі області оптимуму у вигляді рівняння використовуються спеціальні плани. Застосовуючи ортогоналізацію, введено перетворення:

$$x'_i = x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \quad (8)$$

де число експериментів $N = 25$.

Коефіцієнти рівняння регресії для центрального ортогонального композиційного плану визначаються за формулами:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N x'_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N (x'_i)^2}. \quad (9)$$

Дисперсія коефіцієнтів регресії розраховується за формулами:

$$s_{b_0}^2 = \frac{s_0^2}{N}; \quad s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad s_{b_{ij}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}; \quad s_{b_{ii}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum_{u=1}^N (x'_i)^2}, \quad (10)$$

де s_0^2 – помилка досвіду, що визначається за формулою:

$$s_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{k=1}^{N_0} (y_{0k} - \bar{y}_0)^2, \quad (11)$$

де N_0 – число експериментів у центральному плану,

\bar{y}_0 – середнє значення цих експериментів.

Оцінка важливості проводиться за критерієм Стюдента. Дисперсія вільного члена оцінюється за формулою:

$$s_{b_0}^2 = s_{b_0}^2 + \frac{16}{25} \sum_{u=1}^N s_{b_{ii}}^2. \quad (12)$$

Дисперсія адекватності s_{ad}^2 визначається по формулі:

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{u=1}^N (y_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (13)$$

де l – число членів у рівнянні регресії, що залишилися після оцінки значущості.

Адекватність рівняння (13) визначається за критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_0^2}, \quad (14)$$

де умова адекватності $F_p < F_T(\alpha, N-l, N_0-1)$ и F_T – табличне значення критерію Фішера при рівні значущості α .

Для визначення екстремальних значень x_i необхідно знайти приватні похідні цієї моделі і порівняти їх до нуля. Вирішуючи отриману систему, знаходяться стаціонарні точки x_i^* , підставляючи які в другі приватні похідні моделі з членами, що залишилися, обчислюються визначники:

$$a_{11}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \quad (15)$$

де елементами служать значення других приватних похідних у стаціонарних точках $\tilde{y}_{x_i x_k}''(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = a_{ik}$ ($i, k = 1, 2, \dots, n$), визначаючи знаки цих визначників. Оскільки знаки визначника чергуються, починаючи з мінусу, то стаціонарних точках x_i^* є максимум функції регресії.

Використовуючи цю теорію, знайдемо оптимальні значення параметрів щітки та швидкість її обертання для отримання максимальної міцності зчеплення газополум'яного покриття з основою¹⁴.

На основі порівняльних випробувань і математичного аналізу встановлено, що розподіл значень міцності зчеплення покриття з основою для двох технологій відповідають нормальному закону, а середнє значення міцності зчеплення, яке отримане при інтегрованій

¹⁴ Дерябкіна Є.С. Вплив щіткової обробки на рівень залишкових напружень у газополум'яних покриттях. *Наукова періодика України. Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2013. Вип. 59. С. 178–185.

технології напилювання, перевищує на 22% середнє значення міцності зчеплення, отримане відповідно до традиційної технології газополуменевого напилювання.

Визначено вплив основних параметрів щітки на міцність зчеплення покриття з основою при інтегрованому способі. Виконано планування експерименту і складено матрицю для чотирьох конструктивно-технологічних параметрів параметрів щіткової обробки. Обрані інтервали їх варіювання: x_1 – діаметр голок щітки (0,35–0,95мм), x_2 – вільна довжина голок (30–70мм), x_3 – швидкість обертання щітки (800–2500 об/хв), x_4 – щільність розташування голок (20–40 шт/см²)¹⁵.

На основі обробки результатів досліджень встановлена функціональна залежність міцності зчеплення (y_0) від основних параметрів щіткової обробки і отримано рівняння регресії:

$$y_0 = 2,23 + 20,53x_1 + 0,25x_2 + 0,01x_3 + 0,42x_4 - 13,84x_1^2 - 0,003x_2^2 - 0,001x_3^2 - 0,007x_4^2, \quad (16)$$

Для центрального ортогонального планування другого порядку за чотирма показниками в системі Maple була створена програма, що дозволяє вирішити завдання визначення максимальної міцності зчеплення, побудувати багатофакторну регресійну модель, оцінити значущість коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента (при рівні значущості 0,05 і числі ступенів свободи $n - 1 = 3$). Адекватність математичної моделі оцінена за критерієм Фішера. Визначені оптимальні параметри щітки: діаметр голок – 0,8 мм, з вільною довжиною 40 мм при оптимальній кількості обертів – 2100 об/хв і щільності їх розташування – 32 шт/см². Міцність зчеплення при цих оптимальних параметрах склала 27,86 МПа. Залежність міцності зчеплення при двох раціональних параметрах щіткової обробки приведені на рис. 6¹⁶.

Металографічні дослідження (рис.7) показали, як і очікувалося, що в результаті мікропластичного впливу щіткової обробки, щільність напилених покриттів помітно підвищилася, оскільки залишкова пористість склала 8–10% (при традиційній технології 16–18%), причому пори набувають витягнутої форми і зменшуються по перетину до розміру 5–8 мкм (при традиційній технології 10–20 мкм).

Твердість перехідного шару склала $H = 50-330-367$, яка вище, ніж у нікелю $H = 50$ у при процесі кристалізації, що бурхливо протікає.

¹⁵ Полянский А.С., Лузан С.А., Дерябкіна Е.С. Обґрунтування можливості підготовки поверхні металевими щітками для газотермічного напилення покриттів. *Праці Таврійський державний агротехнологічний університет*. 2011. Вип.11. Т.1. С. 34–42.

¹⁶ Дерябкіна Е.С. Дослідження впливу способу нанесення покриттів на якість відновлених деталей засобів транспорту. *Машинобудування*. 2019. Вип 23. С. 100–106.

Перехідний шар, який формується, має дрібнозернисту полієдрічну будову, що обумовлено надшвидкою кристалізацією, яка сприяє утворенню великої кількості крайових дефектів у зерен – вакансій і дислокацій. Зразки, напилені за інтегрованою технологією (рис. 7, а) відрізняються більш дрібнозернистою будовою. Структура таких покриттів представлена більш протяжними «ламелями».

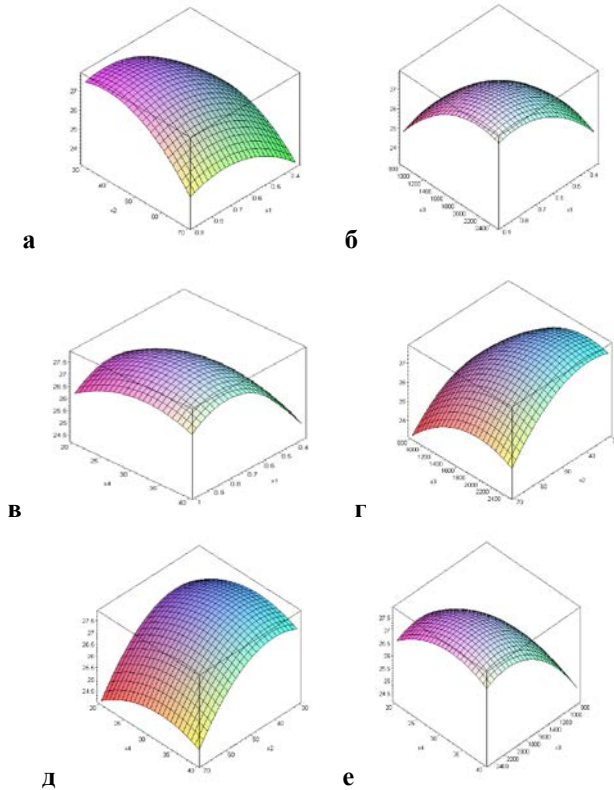


Рис. 6. Залежність міцності зчеплення від параметрів щіткової обробки: а – при $x_3 = 2097$ об/хв та $x_4 = 32$ шт/см²; б – при $x_2 = 39,6$ мм та $x_4 = 32$ шт/см²; в – при $x_3 = 2097$ об/хв та $x_2 = 39,6$ мм; г – $x_1 = 0,78$ мм та $x_4 = 32$ шт/см²; д – $x_1 = 0,78$ мм та $x_3 = 2097$ об/хв; е – $x_1 = 0,78$ мм та $x_2 = 39,6$ мм

Застосування щіткової обробки в процесі формування напилених шарів покриття забезпечує руйнування окисних плівок на межах часток і шарах покриття.

Руйнування окисних плівок металевою щіткою в процесі формування покриття на окремих частках сприяє їх сплавленню за рахунок дії сил Ван – дер – Ваальса. Результати мікрорентгено-спектрального аналізу (рис.8, а і б) свідчать про достатньо рівномірний розподіл елементів за товщиною покриття на зразках, які напилені за інтегрованою технологією, при цьому відхилення їх розподілу за товщиною не перевищує 3–4%.

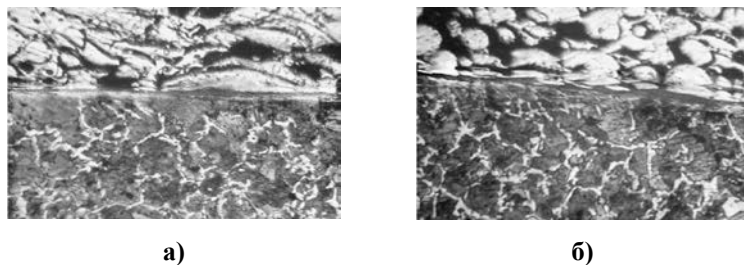


Рис. 7. Структура напилених покриттів сплавом ПГ-10Н-01 на сталі 45(x130) (при $n_1 = 150$ об/хв, $n_2 = 2100$ об/хв, при $N = 3$ мм, $d_i = 0,8$ мм, $l_i = 40$ мм, $p = 32$ шт/см²) отриманих із застосуванням щіткової обробки (а) і без щіткової обробки (б)

Застосування щіткової обробки в процесі формування напилених шарів покриття забезпечує руйнування окисних плівок на межах часток і шарах покриття.

Руйнування окисних плівок металевою щіткою в процесі формування покриття на окремих частках сприяє їх сплавленню за рахунок дії сил Ван – дер – Ваальса. Результати мікрорентгено-спектрального аналізу (рис. 8, а і б) свідчать про достатньо рівномірний розподіл елементів за товщиною покриття на зразках, які напилені за інтегрованою технологією, при цьому відхилення їх розподілу за товщиною не перевищує 3–4%. Дослідженнями встановлено, що відношення середньої концентрації елементів в покритті до її вихідної концентрації у порошку ПГ-10Н-01 складає для нікелю 0,95...0,97, для хрому – 0,93...0,96.

Відзначено збільшення твердості напиленого поверхневого шару при використанні щіткової обробки (рис.9) на 20%. Твердість покриття заміряли методом мікротвердості на шліфах при навантаженні 100 г. При такій методиці випробувань гетерогенної структури неминуче

розсіювання значень вимірювань. Обробка результатів, показала, що для визначення твердості тонкого шару з похибкою до 5% необхідно провести 32 заміри, при діапазоні розсіювання -16,8. Визначено середнє значення твердості напиленого покриття: за традиційною технологією – HV657, за інтегрованою технологією – HV739.

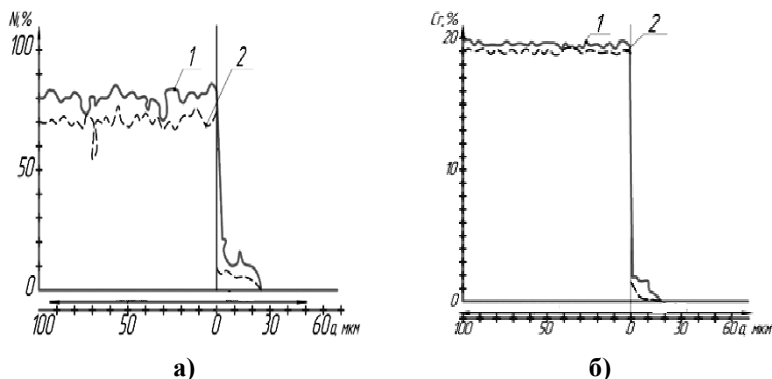


Рис. 8. Розподіл нікелю (а) та хрому (б) в покритті (ПГ-10Н-01) і основі (сталь45): 1 – за інтегрованою технологією; 2 – за традиційною технологією

Розподіл мікротвердості за товщиною покриття більш рівномірний і коливання значень не перевищують 10%. Унаслідок деформаційної дії забезпечується ущільнення шарів покриття та зниження їх пористості. Збільшення твердості в шарах покриття відбувається за рахунок утворення значної кількості дислокацій при бурхливому процесі кристалізації, руйнуванні окисних плівок у покритті та зниження пористості. Будь-яка щіткова обробка знижує пористість напилених покриттів. Максимальне зменшення пористості покриттів з 18% до 8% відзначено при $N = 3\text{ мм}$ і $n = 2100\text{ об/хв}$.

При інтегруванні процесу напилювання газополумєневих покриттів зі щітковою обробкою у покритті знизився рівень розтягувальних залишкових напружень з 20,2 МПа (при традиційному газополумєневому напилюванні) до 16 МПа (рис. 10)¹⁷.

¹⁷ Дерябкіна Є.С. Аналіз впливу механічної обробки на залишкові напруження у газотермічних відновлюючих покриттях. Всеукр. наук.-практ. конф. «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, 9–10 травня 2023р.) Харків: ДБТУ, 2023р. С. 267–268.

Крім того, вплив такої обробки поширюється і на перехідну зону покриття-основа. Напруження стискання знижується з 110 МПа до 80 МПа. Визначено, що збільшення обертів до 2100 сприяє зниженню напружень розтягування в напиленому покритті на 20...40%. Деформовані шари покриття створюють сприятливий розподіл напружень у покритті. Порівняльні випробування на інтенсивність зносу показали (рис. 11), що покриття, напилені за традиційною технологією, незалежно від навантаження випробувань, зношуються більш інтенсивніше – у 1,35 рази порівняно з покриттями, напиленими за інтегрованою технологією.

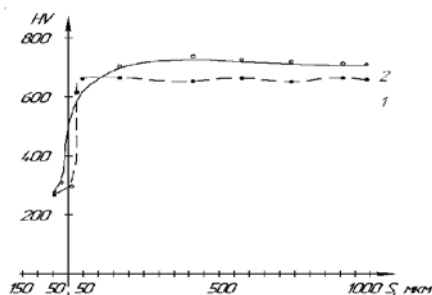


Рис. 9. Розподіл твердості (H) по товщині (S) напилених покриттів: 1 – за традиційною; 2 – за інтегрованою технологією згідно ISO 14577

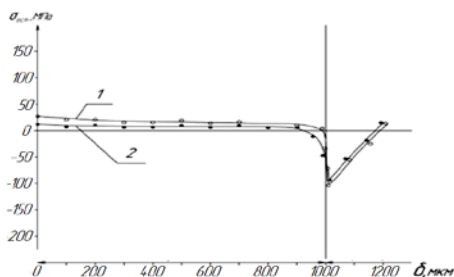


Рис. 10. Розподіл залишкових напружень у покритті ПГ-10Н-01 і основі (сталь 45): 1 – за традиційною; 2 – за інтегрованою технологією

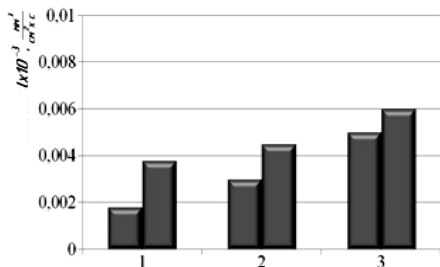


Рис. 11. Інтенсивність зношування пар тертя: 1 – покриття ПГ-10Н-01, напилене інтегрованою технологією – сталь 45 (HRC 52); 2 – покриття ПГ-10Н-01, напилене по традиційній технології – сталь 45 (HRC 52); 3 – колодка – сталь 45 (HRC 50) и диск – сталь 45 (HRC 52)

Виконано оцінку експлуатаційної стійкості відновлених за розробленою технологією плунжерів паливної апаратури двигунів Д50. Показано, що головним чинником зносу і порушення їх роботи є схоплювання в процесі тертя роботи деталей з твердими частками, які потрапляють з паливом¹⁸.

Комплексна оцінка доцільності проведення конструктивно-технологічних заходів, спрямованих на підвищення надійності роботи плунжерних пар паливної апаратури двигунів типу Д50 зазвичай виконується з урахуванням натурних випробувань. Проте в даний час це важко, а в ряді випадків неможливо, через великі витрати матеріальних засобів і часу до остаточного доведення деталей. Крім того, при натурних випробуваннях у зв'язку з одночасною зміною цілого ряду взаємопов'язаних факторів, важко однозначно визначити вплив проведених досліджень на підвищення зносостійкості та надійності деталей.

Розроблено розрахункову модель з епюрами сил по довжині контакту втулки і плунжера. Знос в точці x від дії елементу епюри тиску Pdl складає:

$$dU = K \cdot S \cdot f(x-l) \cdot f(l)dl, \quad (17)$$

де U – величина лінійного зносу плунжера (U_1) по довжині x при $0 \leq x \leq l$; K – коефіцієнт зносу матеріалу плунжера; S – інтенсивність роботи системи в часі; l – максимальний хід плунжерної пари.

Для оцінки зносостійкості проводилися лабораторні випробування зразків, з напиленим покриттям, на машині тертя, а деталей прецизійних плунжерних пар – на спеціальних стендах, що дозволило здійснювати випробування та їх оцінку в умовах, максимально наближених до реальних.

Випробування зразків за визначенням зносостійкості і задирок-стійкості проводилися на машині тертя УМТ-1. У цій установці від приводу забезпечувалося обертання горизонтально розташованого на підставі шпинделя з утримачем рухомого зразка. Нерухомий зразок закріплювався на підставці із забезпеченням самоустановки щодо рухомого зразка та притиснення до останнього. Технічні дані: граничне значення сили притиснення зразка – 4000 Н; діапазон зміни частоти

¹⁸ Дерябка Є.С., Потапенко С.І. Аналіз експлуатаційної стійкості відновлених плунжерних пар паливної апаратури тракторних та комбайнових дизелів. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*. Міжнар. наук.-практ. конференція (Харків, 10–11 лютого 2022 р.). Харків: ДБТУ, 2022. С. 328–330.

обертання шпинделю – 15 ... 3000 об/хв; діапазон зміни моменту сили тертя – 2 ... 40 Нм.

Конструкція випробувальної машини дозволяє проводити випробування зразків за схемою диск-палець, вал-втулка, кільце – кільце. Вона оснащена електромеханічним моментовимірювачем, підключеним до самопишущихся потенціометра КСП – 4. Є також другий – потенціометр КСП-4, призначений для реєстрації температури зразка. Машина оснащена лічильником кількості оборотів шпинделя, автоматичним вимикачем установки при досягненні певного регульованого моменту тертя та іншими пристроями. Притиснення зразків при випробуваннях здійснюється від пневматичного приводу з регульованим тиском стисненого повітря. Для цього використовувався додатково підключений компресор СО-7Б, у випускному ресивері якого було встановлено спеціально виготовлене реле тиску, що забезпечує стабільність тиску стисненого повітря, що подається в машину тертя. Випробування проводилися при торцевому терті (рис. 12а) на зразках з канавками (рис. 12 б).

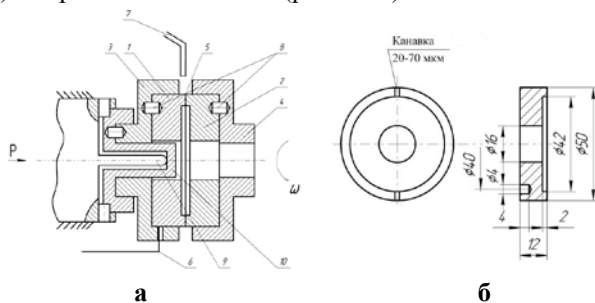


Рис. 12. Схема випробувань зразків на машині тертя УМТ-1 (а), зразок для випробувань (б)

Зразки 1, 2 за допомогою штифтів 8 закріплювалися в утримувач 3, 4, які в свою чергу фіксувалися на машині тертя. В утримачі 3 нерухомого зразка 1 було виконано радіальний отвір, через який встановлювалася термопара 6, гарячий спай, який взаємодіяв із зразком 1 по циліндричній поверхні Ø50 мм на відстані 10 мм від поверхні тертя 5, а дроти термопари були підключені до потенціометра машини тертя. У зону тертя зразків через трубку 7 підводилося дизпально крапельним шляхом, з постійною витратою 3.. 5 крапель/с, яке замінювалося на нове після проведення випробувань кожної пари зразків.

Для забезпечення рівномірного тиску притиснення по поверхні тертя зразків утримувач 3 був встановлений з можливістю самоустановки кульової опори 9 та підставки 10. Для проведення випробувань на

зношування плунжерних пар на стенді тертя здійснювалася розрізання втулок уздовж вісьової лінії на дві напіввтулки електрофізичним методом без нагріву. Випробування вироблялася при підбраному навантаженні притиснення зразків 600 Н протягом 150000 циклів (оборотів), частота обертання зразка становила 320 об/хв, що забезпечувало відповідність швидкостей переміщення зразків плунжера у втулці при їх роботі на дизелі.

Для визначення задиростійкості та зносу плунжерних пар випробували втулки і плунжера зі сталі ШХ15 після термообробки, плунжера з покриттям ПГ-10Н-01, нанесеними інтегрованим газополуменевим напиленням. Плунжерні пари зі сталі ШХ15 з термо-обробкою мають задиростійкість (4160 цикл). Найбільшу задиростійкість мають плунжера з покриттям ПГ-10Н-01(5600) – в 1,35 раза. Отримані результати також засвідчують, що покриття ПГ-10Н-01 забезпечують підвищення термостійкості процесу задирутворення (163-165⁰С) у порівнянні з досліджуваним матеріалом зразків (130-140⁰С). Результати порівняльних випробувань зношування плунжерних пар показали, що нанесені на плунжер покриття на основі ПГ-10Н-01 мають менший знос у порівнянні з термообробленою сталлю ШХ15 в 2,55...2,89 рази.

Визначена критична товщина напиленого покриття, яка визначає його несучу здатність – 28–36 мкм.

Виконані експериментально-аналітичні дослідження дозволили обґрунтувати доцільність відновлення плунжерних пар і технічні можливості застосування покриттів, напилених за інтегрованою технологією, для підвищення їх зносостійкості та зменшення виготовлення запасних частин плунжерних пар дизелів Д50 на 50%.

Експериментальні дослідження та виробничі випробування показали, що запропонований спосіб інтегрованого газополуменевого нанесення зносостійких покриттів виключає недоліки, притаманні нанесеним покриттям за традиційною технологією. Особливе місце в проблемі забезпечення якості покриттів займають методи прогнозування їх властивостей та дослідження зміни властивостей покриттів в процесі експлуатації.

Висока якість продукції потребує сучасних методів його оцінки на вирішення практичних завдань. Оцінка якості виробу залежить від оцінок факторів, що визначають його якість. Такими факторами для оцінки якості напиленого покриття вибрано міцність зчеплення покриття з основою, пористість та зносостійкість напилених покриттів. Кожен фактор може мати свій розподіл якості. Тому виникає завдання знайти оцінку якості виробу, яка б визначалася через оцінки якості факторів, що мають різні розподіли. Побудова оцінки якості виробу

пов'язана зі створенням єдиної узагальненої оцінки, яка кількісно визначає якість безлічі факторів. Набору значень кожного чинника ставиться у відповідність певний стандартний аналог зі шкалою оцінки якості від нуля до одиниці, однотипною всім значень чинників. Побудова цієї шкали пов'язана з розподілом якості чинників. Невирішеним завданням є правило комбінування приватних оцінок факторів з оцінкою якості виробу. Харингтон [70] припустив, що всі вимірювані значення факторів явно завищені, тобто щоразу отримані найбільші значення вимірюваної величини, тому можна застосувати асимптотичний розподіл першого типу.

Будь-яка кількісна оцінка якості, яка визначається одним числом і називається точковою оцінкою, може призвести до помилки, особливо у випадку, коли значення фактора визначається через експертні оцінки. Тому, бажано, крім точкової, знаходити інтервальну оцінку якості виробу.

Приймаючи, що якість фактора підпорядковується такому закону розподілу, який має асимптотичний розподіл найбільшого та найменшого значення першого типу, ми отримуємо як завищене, так і занижене значення якості фактора, тобто інтервал якості фактора. Для вирішення задачі побудови моделі якості та її інтегральної оцінки необхідне лише одне значення величини фактора якості. Для точкової оцінки якості виробу можна взяти середнє значення цих розподілів, оскільки дискретна суміш розподілів є функцією розподілу, а «істина» завжди знаходиться посередині.

З рис. 14 видно, що значення асимптотичних розподілів можуть бути межами інтервальної оцінки якості при фіксованому значенні x , а середнє їх значення – точечна оцінка якості – K :

$$K = (\exp(-\exp(-x)) + 1 - \exp(-\exp(x)))/2, \quad (18)$$

де K – є функція розподілу, так вона є дискретна суміш [75].

Так як до ідеальної якості можна тільки прагнути, а понад погану якість практично не буває, то знайдемо обмеження для x при умові, що максимальна точкова оцінка якості може мати значення, що дорівнює 0,99.

Вирішення рівняння $(\exp(-\exp(-x)) + 1 - \exp(-\exp(x)))/2 = 0,99$ дає значення $x = 3,901938658$. Звідси маємо, що практичний інтервал зміни значення x має вигляд: $(-3,9; 3,9)$. Для знаходження якості фактора за допомогою експертних оцінок визначаються можливі кінці зміни фактора, а потім, знаючи значення фактора, знаходимо в якому відношенні це значення поділяє відрізок із заданими кінцями.

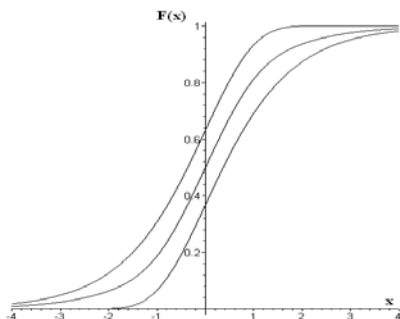


Рис. 13. Асимптотичні розподіли першого типу для найбільшого, найменшого та середнє значення цих розподілів

Якщо ϵ значення фактора, що дорівнює C , а межі цього фактора ϵ кінці відрізка $[A; B]$, тоді, відношення, в якому точка C поділяє відрізок $[A; B]$ дорівнює:

$$\lambda = (C-A)/(B-C) \quad (19)$$

Тоді:

$$X = (-3,9+3,9^\lambda)/(1+\lambda) \quad (20)$$

Інтегральне значення якості I , що складається з m факторів, краще визначати за формулою гармонійного середнього приватних значень K , так як гармонійне середнє менше геометричного середнього, яке у свою чергу менше середнього значення. З іншого боку, $I = 1$ і тоді, коли $K = 1$. Інтегральне значення якості дуже чутливе до малих приватних значень якості K , тому оцінкою якості пропонується така характеристика як середнє гармонійне:

$$I = \frac{m}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{K_j}}, \quad (21)$$

де m – кількість факторів, що входять в інтегральну оцінку;

K – точкова оцінка якості чинника, що має вигляд функції розподілу:

$$K = (\exp(-\exp(-x)) + 1 - \exp(-\exp(x)))/2, \quad (22)$$

де x – середнє значення асимптотичного розподілу.

Отримані результати дозволяють рекомендувати інтегровану технологію газополум'яного нанесення покриттів для відновлення та зміцнення деталей типу вал транспортних засобів. При газополум'яному напилюванні одними з основних можна виділити такі властивості, що характеризують якість покриттів – міцність зчеплення $\sigma_{сп}$, зношування Δ та пористість Ω (рис. 14). Значення цих властивостей

при газополум'яному напиленні знаходяться в таких межах: $5\text{МПа} \leq \sigma_{\text{сц}} \leq 35\text{МПа}$; $0,04\text{мг} \leq \Delta \leq 0,14\text{мг}$; $8\% \leq \Omega \leq 40\%$. За результатами експериментальних досліджень: середні значення для газополум'яного покриття, напиленого за традиційною технологією, склали $\sigma_{\text{сц}1} = 20\text{МПа}$, $\Delta_1 = 0,08\text{мг}$, $\Omega_1 = 18\%$, а для покриття, напиленого із застосуванням щіткової обробки: $\sigma_{\text{сц}2} = 26,8\text{МПа}$, $\Delta_2 = 0,045\text{мг}$, $\Omega_2 = 10\%$ ¹⁹.

Визначено оцінки якості при традиційному газополум'яному напилюванні: за міцністю зчеплення $K_{1\sigma 1} = 0,5$, за інтенсивністю зносу $K_{2\Delta 1} = 0,7597$, за пористістю $K_{3\Omega 1} = 0,8899$; із застосуванням щіткової обробки: за міцністю зчеплення $K_{1\sigma 2} = 0,9201$, за інтенсивністю зносу $K_{2\Delta 2} = 0,9853$, за пористістю $K_{3\Omega 2} = 0,9838$.

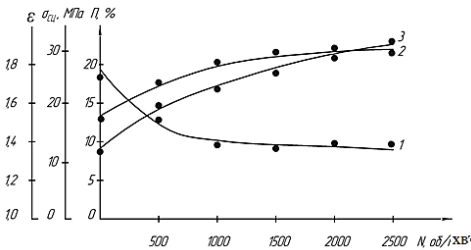


Рис. 14. Вплив швидкості обертання щітки на пористість напилених покриттів (1), міцність зчеплення (2), відносну зносостійкість (3)

Розроблено програму в системі Maple, яка дозволила розрахувати величини якості показників і визначити їх інтервальні оцінки: $I_1 = 0,7165$ – при традиційному способі, $I_2 = 0,9631$ – при інтегрованому способі. Порівняння цих інтервальних оцінок якості свідчить, що запропонована інтегрована технологія газополум'яного напилювання збільшує інтегральний показник якості покриття на 26%.

ВИСНОВКИ

1. Науково обґрунтована і експериментально підтверджена можливість підвищення якості деталей транспорту при їх відновленні за рахунок використання інтегрованого газополум'яного напилювання, яке відрізняється від традиційного тим, що механічна обробка щітковим інструментом використовується для активації поверхні металу перед нанесенням покриття і обробки шарів покриття

¹⁹Дерябкіна Є. С., Потапенко С. І., Іванілов Є. К. Метод оцінки якості відновного покриття. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо – та енергозбереженні: міжнар. наук.-техн. конф. (Одеса, 24–25 листопада 2022р.). Одеса: нац. ун. «Одеська політехніка» 2022. С. 201–202.

в процесі формування. Така інтегрована технологія забезпечує підвищення ефективності процесу відновлення, зниження вартості.

2. Одержане рівняння, що встановлює зв'язок параметрів щіткової обробки з міцністю зчеплення напилених покриттів. Визначено оптимальні конструктивно-технологічні параметри щітки: швидкість обертання – 2100 об/хв, діаметр і вільна довжина голок – 0,8 і 40 мм, щільність розташування голок у щітці -32 шт/см², при яких міцність зчеплення покриття з основою підвищилася до 26–28 МПа (при традиційному газополуменевому напилюванні – 18–20 МПа). Застосування щіткової обробки дозволяє активувати поверхню металу під напилювання, знизити рівень залишкових напружень на 20–40% у покритті, підвищити його твердість на 18-20%.

3. Розроблено метод узагальненої оцінки якості газополуменевих покриттів (за міцністю зчеплення, пористістю, зносостійкістю). Виконані порівняльні лабораторні дослідження за двома технологіями: традиційній та інтегрованій, які показали, що якість покриття останньою перевищує на 26%.

4. Результати і методологія проведення досліджень, методи визначення максимальної міцності зчеплення і узагальненої оцінки якості, розроблені з використанням системи комп'ютерної математики Maple впроваджено в навчальну програму дисципліни «Технологічні процеси і комплекси зміцнення деталей», що викладається магістрам зі спеціальності Галузеве машинобудування.

АНОТАЦІЯ

Проведені дослідження в рамках кафедральної наукової тематики за темою «Розробка та впровадження технологічних процесів виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин з метою підвищення експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності технічних об'єктів» направлені на вирішення питань підвищення експлуатаційних характеристик відновлених деталей засобів транспорту. Для вирішення питання підвищення якості деталей транспортних засобів при їх відновленні і підвищення ефективності технології нанесення зміцнюючих покриттів теоретично доведено і експериментально підтверджено ефективність використання щіткової обробки для активації поверхні металу. Розроблено спосіб відновлення деталей засобів транспорту газополуменевим напиленням інтегрованим зі щітковою обробкою, який полягає в попередній обробці металеву щіткою поверхні під напилювання і пошаровій обробці газопо-луменевого покриття в процесі його формування, що забезпечило підвищення його адгезійної і когезійної міцності і ресурсу відновлених деталей.

Досліджено вплив параметрів шіткової обробки на шорсткість поверхні під напилювання, структуру і твердість, рівень залишкових напружень, пористість, міцність зчеплення і зносостійкість нанесених покриттів. Отримано рівняння регресії, що описують вплив швидкості обертання шітки, діаметра, довжини і щільності набивання голок у шітці на міцність зчеплення покриття з основою. Запропонована методика отримання регламентованої шорсткості поверхні. Розроблено метод узагальненої оцінки якості газополумєневих покриттів (за міцністю зчеплення, пористістю, зносостійкістю). Показано, що використання інтегрованого газополумєневого напилення дозволяє підвищити, порівняно з традиційним якість відновлювальних покриттів на 28% та термін служби відновлених поверхонь деталей в 1,35–1,37 рази. З метою підвищення якості професійної підготовки майбутніх інженерів результати і методологія проведених досліджень, розроблені методи підвищення ефективності і якості напилювання відновлюючих покриттів впроваджено в робочі плани викладання дисципліни «Технологічні процеси і комплекси зміцнення деталей», яка викладається магістрам, що навчаються за спеціальністю Галузеве машинобудування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дергоусова А. О., Романович Є. В. Формування стратегії комунікації для закладу вищої освіти. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Серія: «Економічні науки». 2019. № 10 (30). С. 60–65. DOI: 10.25313/2520-2294-2019-10-5273.
2. Грищенко І.М., Крахмальова Н.А. Інструменти та форми маркетингової комунікації на ринку освітніх послуг. *Ефективність організаційно-економічного механізму інноваційного розвитку вищої освіти України*. Київ: Вісник КНУТД. 2012. № 4. С. 298–307.
3. Звіт про науково-дослідну роботу «Розробка та впровадження технологічних процесів виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин з метою підвищення експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності технічних об'єктів» / А.К. Автухов, О.Ю. Ключко та ін. Харків: ДБТУ, 2023. 138 с. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/54292/1/ZVIT_Avtukhov_Klochko.pdf
4. Ремонт машин та обладнання: підручник / О.А. Науменко, Т.С. Скобло та ін.; за ред. О.І. Сідашенка; передм. О.І. Сідашенка. Київ, 2014. 665 с.
5. Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International, 2004. P. 338. URL: <https://books.google.com.ua> (дата звернення 21.06.2024).

6. Сокур Т.Д, Попіль Ю.С., Корж В.М. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку газотермічних способів нанесення покриття. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут. Серія Машинобудування*. 2011. № 61. С. 168–171. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/4961/3/168.1.pdf>

7. Грицай І.Є., Кукляк М.Л. Різання металів: навч. посібник. Львів, 2005. 132 с.

8. Основи теорії різання матеріалів / Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога та ін.; за заг. ред. М.П. Мазура. Львів, 2011. 422 с.

9. Лузан С.О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей: курс лекцій. Харків : ХНТУСГ, 2020. 127 с.

10. Резніченко М.К., Резніченко О.М, Дерябкіна Є.С. Дослідження роботи і несучої підвищення здатності монорельсового шляху при змінному навантаженні. *Наука і техніка сьогодні*. 2022. Вип. 9. (9). С. 10–18.

11. Спосіб напилювання газотермічного порошкового покриття: пат. 44994 Україна: МПК 2 С23С4/00; № u200904703; заявл. 12.05.09; опубл. 12.10. 09, Бюл. № 19. 3 с.

12. Дерябкіна Е. С. Оптимізація параметрів обробки поверхні деталей під напилювання відновних покриттів. *Машинобудування*. 2017. № 20. С. 77–84.

13. Дерябкіна Є.С., Нефьодов А.І. Голкофрезерування як спосіб підготовки поверхні під нанесення покриттів. *Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XIX міжнар. форуму молоді* (Харків, 17–18 травня 2023р.). Харків : ДБТУ, 2023. С. 133.

14. Дерябкіна Є.С. Вплив щіткової обробки на рівень залишкових напружень у газополум'яних покриттях. *Наукова періодика України. Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2013. Вип. 59. С. 178–185.

15. Полянский А.С., Лузан С.А., Дерябкіна Е.С. Обґрунтування можливості підготовки поверхні металевими щітками для газотермічного напилення покриттів. *Праці Таврійський державний агротехнологічний університет*. 2011. Вип.11. Т.1. С. 34–42.

16. Дерябкіна Є.С. Дослідження впливу способу нанесення покриттів на якість відновлених деталей засобів транспорту. *Машинобудування*. 2019. Вип 23. С. 100–106.

17. Дерябкіна Є.С. Аналіз впливу механічної обробки на залишкові напруження у газотермічних відновлюючих покриттях. Всеукр. наук.-практ. конф. «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, 9–10 травня 2023 р.) Харків: ДБТУ, 2023. С. 267–268.

18. Дерябкіна Є.С., Потапенко С.І. Аналіз експлуатаційної стійкості відновлених плунжерних пар паливної апаратури тракторних та

комбайнових дизелів. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*. Міжнар. наук.-практ. конференція (Харків, 10–11 лютого 2022 р.). Харків: ДБТУ, 2022. С. 328–330.

19. Дерябкіна Є. С., Потапенко С. І., Іванілов Є. К. Метод оцінки якості відновного покриття. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо – та енергозбереженні: міжнар. наук.-техн. конф. (Одеса, 24–25 листопада 2022 р.). Одеса: нац. ун. «Одеська політехніка», 2022. С. 201–202.

Information about the author:

Deryabkina Evgeniya Stanislavivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Service Engineering and
Materials Technology in Mechanical Engineering
State Biotechnological University
44, Alchevskih Street, Kharkiv, 61002, Ukraine