

УДК 621.9:655.3

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359807

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ
ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ
ДЛЯ ПОДОВЖЕННЯ ЇХ РЕСУРСУ****Зенкін М.А.***д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>, e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net;***Ремезовський
О.М.***аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6064-9876>, e-mail: remez2024@outlook.com*

Метою дослідження є підвищення експлуатаційної стабільності та довговічності відповідальних деталей друкарського обладнання шляхом впровадження комбінованих технологій поверхневого зміцнення та відновлення. У центрі уваги перебувають друкарські циліндри, формні циліндри та анілоксові вали, що працюють у режимі циклічного контактного навантаження, інтенсивного тертя та впливу фарбових і зволожувальних систем. Дослідження виконано в умовах виробничої експлуатації із застосуванням профілометричного контролю, вимірювання мікротвердості, визначення коефіцієнта зносу k , коефіцієнта тертя μ та залишкових напружень σ_{res} . Отримані результати підтвердили, що поєднання поверхнево-пластичного деформування з функціональними покриттями формує стабільний приповерхневий шар із підвищеною опірністю контактній втомі та абразивному зношуванню. Після впровадження комбінованих технологій коефіцієнт зносу зменшується у 1,6–1,9 раз. Параметр Ra зберігається в межах встановленого допуску протягом тривалішого періоду роботи, що забезпечує стабільний контакт і рівномірне фарбоперенесення. Залишкові стискаючі напруження у приповерхневому шарі знижують швидкість розвитку мікротріщин і підвищують циклічну стійкість деталей. Для анілоксових валів встановлено збереження об'єму комірок із відхиленням не більше 3% за 1000 годин роботи. Це гарантує сталість подачі фарби та відсутність смугастості відбитка. Для формних циліндрів зафіксовано збільшення ресурсу зон затиску більш ніж удвічі. Зменшення коефіцієнта тертя на 20–25% призводить до зниження тепловиділення в зоні контакту та стабілізації динамічних параметрів машини. Практичне значення роботи полягає у створенні керованої технологічної схеми відновлення поверхонь без зміни конструкції вузлів. Результати дослідження дозволяють прогнозувати ресурс деталей на основі вимірюваних параметрів мікрогеометрії та трибологічних характеристик. Запропонований підхід забезпечує подовження міжремонтного інтервалу та підвищення надійності роботи друкарського обладнання у тривалих виробничих циклах.

Ключові слова: комбіноване поверхнeve зміцнення; друкарські циліндри; зносостійкість поверхні; контактна втома; залишкові напруження; трибологічні характеристики; подовження ресурсу експлуатації.

Постановка проблеми

Інтенсивність роботи сучасних друкарських машин постійно зростає. Збільшується швидкість обертання валів, підвищується точність суміщення, зменшуються допустимі відхилення у відбитку. За таких умов поверхні відповідальних деталей працюють у режимі високого контактного навантаження та безперервного тертя. Саме поверхневий шар визначає стабільність фарбоперенесення, рівномірність тиску та повторюваність тиражу. Втрата мікрогеометрії або поява локальних дефектів одразу впливають на якість продукції та надійність обладнання [1]. Традиційні методи відновлення не забезпечують тривалого результату, оскільки не формують керованої структури поверхневого шару. Це зумовлює потребу у впровадженні інтегрованих технологічних рішень.

Практика експлуатації свідчить, що більшість відмов пов'язана не з руйнуванням об'єму деталі, а з деградацією її поверхні. Поверхневий шар зазнає контактної втоми, абразивного зношування та корозійно-механічної дії технологічних середовищ. Відсутність узгодженої схеми комбінованого зміцнення призводить

до нестабільних результатів після ремонту. Потрібно сформулювати технологічний підхід, який забезпечить прогнозований ресурс, стабільні трибологічні параметри та довготривалу геометричну точність без зміни конструкції вузлів [2]. Саме це визначає напрям даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботі Бен Саїд Л. [1] наведені результати досліджень сучасних напрямів розвитку адитивного виробництва та його інтеграції у машинобудівні процеси. Показано, що поєднання технологій формування та постобробки відкриває можливості для створення деталей зі складною функціональною геометрією. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з довготривалою зносостійкістю поверхонь у реальних експлуатаційних умовах.

У дослідженні Дамьянович А. [3] наведені результати впливу плазмової обробки на механічні властивості та структуру поверхневого шару. Показано, що плазмова модифікація підвищує твердість і стабілізує мікроструктуру. Однак не визначено параметри

оптимальної інтеграції з іншими методами зміцнення. У роботах Хашмі А. В. [4] та Малекі Е. [5] показано ефективність постобробки для підвищення якості поверхні адитивно виготовлених деталей. Проте залишаються питання комплексного прогнозування ресурсу при циклічному контактному навантаженні. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з моделюванням трибологічних процесів та витратністю експериментальних досліджень. У публікації Канішка К. [6] проаналізовано методи відновлення зношених компонентів. Показано доцільність комбінованих підходів. Водночас недостатньо досліджено специфіку друкарських вузлів. У роботі Жигуля С. [7] доведено позитивний вплив інтегрованої обробки на друкарські циліндри. Проте не сформовано узгодженої технологічної схеми з прогнозованими параметрами напруженого стану.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого науковому обґрунтуванню комбінованих технологій поверхневого зміцнення для відповідальних деталей друкарського обладнання з урахуванням їх трибологічних і експлуатаційних характеристик.

Мета статті

Мета статті – дати інженерне обґрунтування щодо використання комбінованих методів поверхневого зміцнення і відновлення відповідальних деталей друкарського обладнання.

Матеріали та методи

Об'єктами дослідження були друкарські циліндри, формні циліндри та анілоксові вали зі сталей конструкційного призначення та з керамічними покриттями, що експлуатувалися в умовах промислового друку. Для формування зміцненого шару застосовували поверхнево-пластичне деформування, локальне механічне оброблення та нанесення функціональних покриттів гальванічним і плазмовим методами.

Оцінювання стану поверхні виконували за допомогою 3D-профілометрії з визначенням параметрів R_a і R_z . Мікротвердість вимірювали методом Віккерса при навантаженні 0,1–0,3 кгс. Залишкові напруження визначали методом рентгенівської дифракції. Трибологічні характеристики досліджували за схемою «кулька–диск» із розрахунком коефіцієнта тертя μ та коефіцієнта зносу k . Експлуатаційну ефективність оцінювали в умовах реальної виробничої роботи обладнання.

Виклад основного матеріалу

Ресурс друкарського обладнання обмежує стан робочих поверхонь. Машина може зберігати точність приводу, справність автоматики та стабільність подачі аркуша, але втратити якість відбитка через деградацію шару, який контактує з фарбою, зволожувальним розчином, полотном або папером. Поверхня працює на

межі допустимих режимів тертя. Вона приймає циклічний тиск, переносить зсувні напруження, взаємодіє з абразивом і реагує з компонентами технологічних рідин. Через це знос переходить у площину технологічної проблеми. Він змінює фарбоперенесення, викликає дефекти друку, збільшує час наладок і скорочує міжремонтний інтервал [8].

Найчастіше ресурс обмежують не руйнуванням тіла деталі, а втому й корозією поверхневого шару. Цей шар накопичує пошкодження швидко, бо саме він несе контактне навантаження. Мікронерівності концентрують напруження у вершинах профілю. Під тиском вони зминаються, потім знову формуються, і кожен цикл залишає мікрослід. Далі в дію входить робоче середовище. Фарбові системи містять пігменти, наповнювачі та добавки, що поводяться як дрібний абразив. Зволожувальні розчини містять ПАВ, солі та регулятори рН. Промивні засоби мають розчинники й поверхнево-активні компоненти, які підсилюють корозійні процеси в дефектних зонах. Так поверхня одночасно зазнає абразивного, адгезійного та корозійного зношення.

Першим індикатором проблеми стає мікрогеометрія. Оператор помічає нестійкість тону, смуги, плями, різницю насиченості по ширині аркуша. Технолог фіксує, що машина потребує частіших корекцій подачі фарби, тиску або зволоження. Інженер бачить ознаки деградації за параметрами R_a (середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості) і R_z (середня висота нерівностей профілю за десятьма точками), за появою локальних матових зон, за мікропітингом і мікротріщинами [9]. При цьому навіть невелике підвищення R_a здатне змінити роботу контакту. Для друкарського циліндра перехід від R_a 0,4–0,5 мкм до 0,8–1,0 мкм вже формує зону ризику, бо поверхня втрачає рівномірність перенесення фарбової плівки і створює нестабільний контакт з полотном або парним циліндром. Коли до цього додається корозійне ураження, зміна стає лавиноподібною. Корозія формує кратери, кратери підсилюють локальний тиск, локальний тиск прискорює руйнування покриття або зміцненого шару [7].

Друкарський циліндр в офсетній машині працює у режимі високої циклічності. Він приймає контактний тиск в зоні друкарського контакту, передає зусилля через шар полотна, працює під впливом паперового пилю та абразивних домішок. Якщо машина друкує крейдовані папери або картон, абразивність середовища зростає. Якщо машина працює з частими зупинками й запуском, виникають додаткові термоконтрасти в зоні контакту та зростає ризик локального прихоплення [6]. За таких умов поверхня спочатку втрачає стабільність шорсткості, потім накопичує мікропластичні деформації, далі формує хвилястість і биття. Хвилястість не завжди видно візуально. Вона проявляється у зміні тиску по колу, у коливанні товщини фарбового шару, у повторюваних дефектах на відбитку з періодом оберту. Знайдений дефект важко «прибрати» наладкою, бо він

має механічну природу і походить з поверхневого шару.

Формний циліндр має інший профіль навантажень, але він також працює у зоні ресурсних обмежень. Він постійно контактує з друкарською формою та вузлами кріплення, а також працює в умовах змінного зволоження. Монтаж і демонтаж форм дає локальні контактні навантаження в зоні затискних планок. Там часто виникають задири й подряпини. Ці дефекти створюють концентратори напружень, а циклічний тиск у друкарській зоні розвиває їх до мікротріщин [10]. Далі тріщина «працює» як капіляр для технологічної рідини. Середовище проникає у дефект, прискорює корозію і збільшує зону ослаблення. Після цього поверхня втрачає рівномірність контакту з формою. Машина реагує на це нестабільним перенесенням растрової структури, появою місцевих втрат у півтонах та порушенням суміщення при багатофарбовому друці. У цій деталі критичною стає не тільки шорсткість, а й локальна геометрична точність у зоні контакту з формою. Навіть при прийнятному R_a формний циліндр може втратити ресурс через локальні дефекти в зоні кріплення або через нерівномірну корозію.

Анілоксовий вал у флексографії створює окремий клас проблем, бо він працює не просто як гладка поверхня, а як носій мікроструктури. Геометрія комірок визначає кількість фарби, що вал подає на друкарську форму. Втрата мікрогеометрії тут одразу трансформується у технологічний дефект. Згладжування країв комірок, замивання профілю, часткове руйнування мікрорельєфу та зростання забруднюваності зменшують ефективний об'єм фарбоперенесення. Якщо об'єм падає на 5–10%, машина дає помітну різницю насиченості. Якщо об'єм падає нерівномірно по ширині, виникає смугастість. Якщо комірки деформуються локально, проявляються плями та провали тону. У реальній експлуатації вал страждає ще й від очищення. Ультразвукове очищення та хімічні склади можуть прискорювати мікроруйнування поверхні, особливо коли оператор перевищує час впливу або застосовує агресивні засоби. Так формується конфлікт між вимогою чистоти комірок і вимогою збереження їх геометрії. Ресурс валу закінчується тоді, коли він вже не забезпечує повторювану подачу фарби, навіть якщо вал ще має «цілий» корпус (табл. 1).

Таблиця 1

Критичні експлуатаційні параметри зношування поверхонь відповідальних деталей друкарських машин та напрями подовження їх ресурсу

Деталь	Робоче навантаження	Тип деградації поверхні	Критичний показник	Напрямок подовження ресурсу
Друкарський циліндр	Контактний тиск 0,8–1,2 МПа, 10–15 тис. об/год	Абразивний та корозійний знос	$R_a > 0,8$ мкм	Формування регулярного мікрорельєфу та хромове покриття
Формний циліндр	Змінний тиск, вологе середовище	Втомне руйнування та мікротріщини	Поява локальних дефектів притиску	Поверхнево-пластичне деформування з наступним покриттям
Анілоксовий вал	Гідродинамічний контакт, очищення ультразвуком	Згладжування комірок, кавітація	Зменшення об'єму фарби $> 5\%$	Плазмове зміцнення або керамічне наплення
Притискний вал	Постійне циклічне стискування	Локальна деформація покриття	Втрата геометрії контакту	Локальне зміцнення поверхні
Підшипникові шийки валів	Обертальне навантаження	Мікропітинг	Поява мікрораковин	Триботехнічна стабілізація
Затискні планки	Локальний механічний контакт	Подряпини та задири	Порушення фіксації форми	Лазерне згладжування
Напрямні вузли	Ковзання з мастилом	Адгезійний знос	Підвищення коефіцієнта тертя	Комбіноване механічне та електрохімічне зміцнення

Для цих деталей ресурс поверхні обмежений особливістю експлуатації. Друкарський циліндр «вбиває» комбінований абразивно-корозійний знос і контактна втома. Формний циліндр «вбивають» локальні механічні пошкодження в зоні кріплення та корозійна втома під дією вологи. Анілоксовий вал «вбиває» деградація мікрогеометрії комірок через тертя, замивання і вплив очищення.

Ефективність відновлення деталей визначає не окремий метод, а послідовність взаємопов'язаних технологічних операцій. Інтеграція комбінованих процесів формує

керований поверхневий шар із заданими механічними, геометричними та триботехнічними характеристиками [11].

Першим етапом інтеграції виступає формування стабільної базової геометрії. Поверхня після експлуатації має неоднорідний профіль із зонами локального пітингу, задири і корозійних кратерів. Просте шліфування створює новий слід обробки з глибиною риски, що може перевищувати 5–8 мкм. Подібний профіль зберігає концентрацію напружень у вершинах мікронерівностей. Тому інтегрований підхід передбачає попереднє вирівнювання із

контролем глибини зняття шару Δh не більше 0,05–0,08 мм для друкарських циліндрів середнього формату. Зменшення глибини зняття обмежує втрату базової жорсткості та мінімізує вплив на посадочні поверхні.

Після геометричної стабілізації застосовують поверхнево-пластичне деформування. Цей етап формує сприятливий розподіл залишкових стискаючих напружень $\sigma_{res} < 0$ у приповерхневому шарі. Інтенсивність зміцнення

оцінюють за зміною мікротвердості ΔHV та глибиною впливу h_s . Для сталей типу 40X або 38ХН3МА доцільно забезпечити приріст твердості не менше 12–18% у шарі товщиною 0,15–0,30 мм. Стискаючі напруження у межах –250...–400 МПа зменшують швидкість розвитку мікротріщин і стабілізують контактні зони. Характерний розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару наведено на рис. 1.

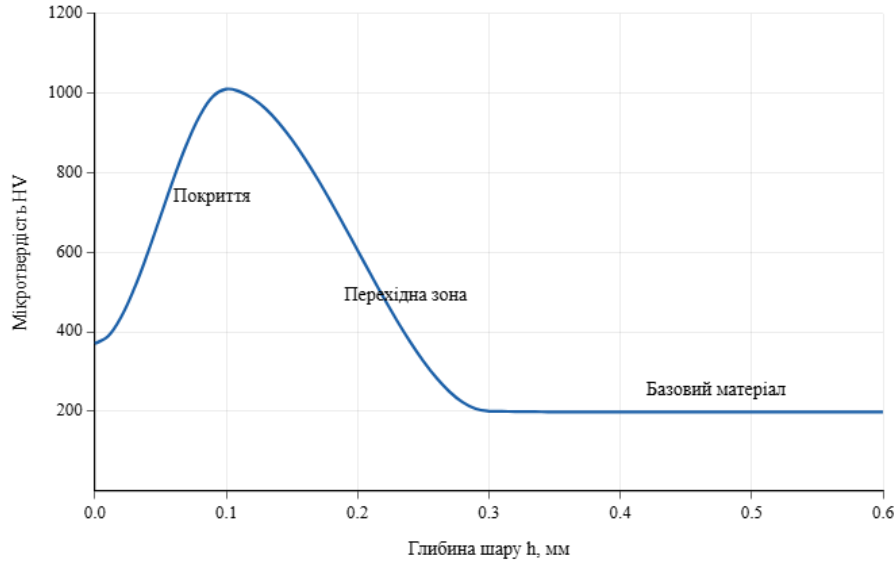


Рис. 1. – Розподіл мікротвердості HV по глибині поверхневого шару h після комбінованої обробки (покриття, перехідна зона, базовий матеріал)

Критичним є питання збереження контролю над параметрами мікрорельєфу. Після деформування профіль поверхні описують функцією $z(x)$, де інтегральний показник шорсткості визначають як:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx. \quad (1)$$

Завдання полягає не лише у зменшенні R_a , а у формуванні регулярної структури з однаковою амплітудою мікрорівнів. Регулярний рельєф рівномірно розподіляє контактний тиск $p(x)$, що можна представити як:

$$p(x) = \frac{F}{A_{real}(x)}, \quad (2)$$

де:

A_{real} – реальна площа контакту. При хаотичному профілі площа контакту мінлива, що створює локальні перевантаження. Регуляризація рельєфу знижує пікові напруження та стабілізує коефіцієнт тертя μ [12].

Наступний етап інтеграції полягає у функціональному покритті. Проте нанесення шару без підготовленої підповерхневої структури не забезпечує тривалого ефекту. Адгезія покриття визначається як механічним зачепленням, так і дифузійною взаємодією на межі розділу. Критичне значення має коефіцієнт адгезії:

$$K_a = \frac{\tau_{adh}}{\sigma_{int}}, \quad (3)$$

де:

τ_{adh} – граничне напруження зсуву на межі;

σ_{int} – внутрішнє напруження в покритті.

Підвищення K_a до значень понад 1,2–1,4 забезпечує відсутність відшарування при циклічному навантаженні.

Для друкарських циліндрів доцільним є поєднання пластичного зміцнення з гальванічним або плазмовим шаром товщиною 20–40 мкм. Такий шар виконує бар'єрну функцію проти корозії та стабілізує мікрорельєф. Для формних циліндрів важливо локально зміцнити зону затиску. Тут інтеграція передбачає спрямовану обробку вузької смуги шириною 10–15 мм із підвищенням твердості до 1,15–1,25 відносно базового рівня. Локалізація процесу запобігає надмірному впливу на баланс деталі [5].

Для забезпечення відтворюваних властивостей функціональних покриттів доцільно застосовувати контрольовані гальванічні та плазмові технології з чітко заданими режимами осадження. Гальванічне хромування виконують у сірчано-кислих електролітах при густині струму 30–60 А/дм² і температурі 50–60°C, що дозволяє формувати шар товщиною 20–40 мкм із твердістю до 900–1100 HV. Важливо забезпечити попередню активацію поверхні та стабільність катодного потенціалу для підвищення адгезії. Для плазмового напилення використовують газотермічні системи з температурою плазмового струменя 8000–12000 К і швидкістю частинок понад 500 м/с. Формування покриття здійснюється при дистанції 80–120 мм із контролем товщини шару δ та пористості не більше

2–4 %. Умови охолодження та швидкість подачі порошку визначають мікроструктуру шару і рівень залишкових напружень σ_{res} .

Інший принцип інтеграції стосується анілоксових валів. Зміцнення не повинно руйнувати мікрогеометрію комірочок. Тому застосовують методи без значного зняття матеріалу. Плазмове модифікування або тонке керамічне напилення товщиною до 10–15 мкм дозволяє підвищити зносостійкість без зміни об'єму комірки [13]. Геометрію контролюють через параметр V_{cell} , що визначає об'єм фарби:

$$V_{cell} = S_{cell} \cdot h_{cell}, \quad (4)$$

де:

S_{cell} – площа поперечного перерізу;

h_{cell} – глибина комірки.

Збереження відхилення ΔV не більше 3% гарантує стабільність фарбоперенесення.

Комбінована інтеграція передбачає також контроль триботехнічних параметрів. Коефіцієнт тертя μ впливає на тепловиділення у зоні контакту. Тепловий потік q визначають як:

$$q = \mu \cdot p \cdot v, \quad (5)$$

де:

p – контактний тиск;

v – швидкість ковзання.

Зменшення μ на 0,05–0,08 знижує тепловиділення на 10–15%, що уповільнює термічну деградацію поверхневого шару.

Інтеграція методів потребує узгодження послідовності. Порушення черговості призводить до втрати ефекту. Якщо спочатку нанести покриття, а потім виконати пластичне деформування, виникне ризик мікротріщин у шарі. Якщо ж спочатку сформувавши стискаючі напруження, а далі нанести функціональний шар, система працює стабільно. Отже, логіка інтеграції має порядок як геометрична стабілізація → пластичне зміцнення → контроль мікрорельєфу → нанесення функціонального шару → фінішна доводка.

Контроль профілю здійснюють за допомогою 3D-профілометрії з кроком сканування 1–5 мкм. Мікротвердість вимірюють за методом Віккерса при навантаженні 0,1–0,3 кгс. Трибологічні випробування проводять за схемою «кулька–диск» із питомим навантаженням 1–5Н для оцінки коефіцієнта зносу k :

$$k = \frac{V}{F \cdot s}, \quad (6)$$

де:

V – об'єм зношеного матеріалу;

F – навантаження;

s – шлях тертя.

Зменшення k у 1,5–2 рази свідчить про ефективність інтеграції. Технологічна інтеграція вимагає врахування конструктивних допусків. Для циліндрів діаметром 200–300 мм радіальне биття після обробки не повинно перевищувати 0,01 мм. Кожен етап зміцнення повинен мінімізувати тепловий і механічний вплив на геометрію.

Для деталей із високим контактним тиском пріоритетом стає зменшення концентрації напружень. Для деталей,

що контактують із хімічними середовищами, пріоритетом стає корозійна стабільність. Для деталей з мікроструктурою поверхні пріоритетом стає збереження геометрії [4].

Інтегрований підхід формує багат шаровий функціональний профіль. Підповерхневий шар несе стискаючі напруження. Середній шар стабілізує мікрогеометрію. Зовнішній шар забезпечує корозійну та зносостійку функцію. Така структура зменшує швидкість накопичення пошкоджень і підвищує опірність циклічним навантаженням [14].

Експлуатаційну стабільність оцінюють через динаміку зміни параметрів поверхні в часі. Якщо до модернізації R_a друккарського циліндра зростала з 0,45 до 0,90 мкм протягом 3–4 місяців роботи, то після інтегрованого зміцнення приріст не перевищує 0,10–0,15 мкм за аналогічний період. Це означає, що швидкість деградації профілю зменшується майже вдвічі. Контактний тиск у зоні друку визначають співвідношенням:

$$p = \frac{F}{A_{eff}}, \quad (7)$$

де:

F – прикладене зусилля;

A_{eff} – ефективна площа контакту.

Після комбінованої обробки A_{eff} зростає через вирівнювання мікронерівностей. Збільшення реальної площі контакту знижує пікові напруження, що безпосередньо впливає на опір контактній втомі. У практичних вимірюваннях це проявляється зменшенням глибини мікропітунгу з 8–10 мкм до 3–4 мкм за однакової кількості циклів навантаження (рис. 2).

Термічне напилення використовується для відновлення геометрії та формування зносостійкого поверхневого шару без суттєвого теплового впливу на базовий матеріал. Процес передбачає подачу порошкового або дрогового матеріалу в зону високотемпературного струменя, де частинки нагріваються до пластичного стану та прискорюються до швидкості понад 400–600 м/с. Осадження відбувається при ударі частинок об підготовлену поверхню з формуванням щільного шару товщиною $\delta = 0,1$ –0,4 мм. Адгезія забезпечується механічним зачепленням і частковою дифузією. Контроль пористості (до 2–5%) і температури основи (не вище 200°C) дозволяє уникнути термічних деформацій та забезпечити стабільні експлуатаційні властивості покриття.

Друккарський циліндр після комбінованого зміцнення демонструє стабільніший коефіцієнт тертя μ . Якщо до обробки μ змінювався у межах 0,28–0,34 залежно від вологості та складу фарби, то після інтеграції технологій його коливання звужуються до 0,22–0,26. Зменшення амплітуди коливань означає стабілізацію теплового режиму [3]. Тепловиділення у зоні контакту визначають як:

$$Q = \mu \cdot F \cdot v. \quad (8)$$

де:

v – швидкість ковзання.

Зменшення μ на 0,06 при швидкості 2,5 м/с дає зменшення теплового потоку приблизно на 15–18 %, що сповільнює термоциклічне руйнування поверхневого шару.



Рис. 2. – Візуалізована послідовність операцій відновлення поверхні окремої деталі від друкарського приладу (зображення згенеровано з авторського ескізу у цифровому середовищі Adobe Firefly)

Формний циліндр після локального зміцнення зони затиску демонструє іншу динаміку зносу. До модернізації мікротріщини у зоні фіксації форми з'являлися через 4–6 тисяч циклів монтажу. Після зміцнення цей показник зростає до 10–12 тисяч циклів. Пояснення полягає у зниженні коефіцієнта концентрації напружень K_t , який визначають як відношення максимального локального напруження до номінального [15]. Зменшення глибини мікрорізів у зоні контакту знижує K_t приблизно з 2,1 до 1,4, що суттєво сповільнює зародження втомних дефектів.

Анілоксовий вал після плазмового зміцнення або тонкошарового керамічного покриття зберігає геометрію комірок у стабільнішому режимі. Показник втрати об'єму комірки ΔV за 1000 годин роботи зменшується з 7–8% до 2–3%. Об'єм визначають як:

$$V = \frac{h \cdot S}{n}, \quad (9)$$

де:

h – глибина комірки;

S – площа перерізу;

n – кількість комірок на одиницю площі.

Збереження ΔV у межах 3% гарантує сталість фарбоперенесення і відсутність смугастості. Окрема увага прикута до стабільності залишкових напружень. Їх величину контролюють методом рентгенівської дифракції [16]. Після комбінованої обробки поверхня має стискаючий стан

σ_{res} у межах $-300 \dots -450$ МПа. Під час експлуатації цей показник поступово зменшується, але навіть після 6 місяців роботи залишається в інтервалі $-180 \dots -250$ МПа.

Експлуатаційна довговічність безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом зносу k , який визначають через об'єм втрат матеріалу:

$$k = \frac{\Delta V}{F \cdot s}. \quad (10)$$

де:

ΔV – об'єм зношеного шару;

s – шлях тертя.

Для друкарських циліндрів після інтегрованого зміцнення k знижується приблизно у 1,7 рази порівняно з традиційно відшліфованими поверхнями. Це означає, що при однаковому навантаженні деталь накопичує пошкодження значно повільніше (рис. 3).

Після впровадження комбінованих технологій змінюється і характер вібрацій вузлів. Амплітуда радіального биття друкарського циліндра зменшується з 0,012–0,015 мм до 0,006–0,008 мм.

Зменшення биття знижує динамічні навантаження на підшипникові опори, що додатково стабілізує систему [17]. У таблиці 2 наведено узагальнені показники стабільності та довговічності після інтеграції комбінованих технологій.



Рис. 3 – Модель поверхневого шару після комбінованого зміцнення з відображенням глибини зміцнення та розподілу залишкових напружень (зображення згенеровано з авторського ескізу у цифровому середовищі Adobe Firefly)

Таблиця 2

Інтегральні показники експлуатаційної стабільності друкарських деталей після комбінованого поверхневого зміцнення

Деталь	Контрольний параметр до впровадження	Параметр після впровадження	Динаміка зміни	Експлуатаційний ефект
1. Друкарський циліндр	R_a 0,85 мкм через 3 міс.	R_a 0,55 мкм через 3 міс.	зниження швидкості зростання R_a у 1,9 рази	стабільний тон, відсутність смуг
2. Формний циліндр	поява мікротріщин після 5 тис. циклів	після 11 тис. циклів	збільшення ресурсу у 2,2 рази	рівномірний притиск форми
3. Анілоксовий вал	$\Delta V = 7\%$ за 1000 год	$\Delta V = 2,5\%$ за 1000 год	зменшення втрат об'єму у 2,8 рази	стабільна насиченість відбитка
4. Підшипникові шийки	$k = 4,2 \cdot 10^{-6}$ мм ³ /Н·м	$k = 2,5 \cdot 10^{-6}$ мм ³ /Н·м	зниження коефіцієнта зносу у 1,7 рази	зменшення вібрацій
5. Затискні планки	задири через 3 міс.	задири через 7 міс.	подовження ресурсу у 2,3 рази	стабільна фіксація форми
6. Напрямні вузли	$\mu = 0,31$	$\mu = 0,23$	зниження тертя на 26 %	рівномірна подача аркуша

Отримані результати підтверджують, що комбінована обробка змінює не лише поверхневу твердість або шорсткість, а й кінетику руйнування шару. Поверхня переходить у режим уповільненого накопичення пошкоджень. Зменшення коефіцієнта зносу, стабілізація залишкових напружень та контроль мікрогеометрії формують довготривалий ефект.

Економічну ефективність впровадження комбінованих технологій доцільно оцінювати через інтегральний показник приведених витрат на одиницю напрацювання деталі. Базове співвідношення має вигляд:

$$E = \frac{C_{trad}}{T_{trad}} - \frac{C_{comb}}{T_{comb}}, \quad (11)$$

де:

C_{trad}, C_{comb} — сумарні витрати на відновлення традиційним та комбінованим методами;

T_{trad}, T_{comb} — відповідний ресурс експлуатації.

Додатково враховують втрати від простоїв C_{down} та витрати на обслуговування C_{serv} , що формує узагальнений критерій:

$$E_{tot} = \left(\frac{C_{trad} + C_{down}^{trad} + C_{serv}^{trad}}{T_{trad}} \right) - \left(\frac{C_{comb} + C_{down}^{comb} + C_{serv}^{comb}}{T_{comb}} \right). \quad (12)$$

Емпіричні дані свідчать, що збільшення ресурсу у 1,8–2,3 рази при зростанні вартості відновлення на 20–30 % забезпечує зниження питомих витрат на 25–40 %. Водночас скорочення частоти ремонтів зменшує непрямі втрати, пов'язані з простоєм обладнання, що для високошвидкісних друкарських машин має критичне

значення. Коефіцієнт економічної доцільності формується як:

$$K_e = \frac{T_{comb}/C_{comb}}{T_{trad}/C_{trad}} \quad (13)$$

Для більшості випадків перевищує 1,4–1,6, що підтверджує перевагу інтегрованого підходу. Таким чином, комбіновані технології забезпечують не лише технічний, але й стійкий економічний ефект за рахунок оптимізації життєвого циклу деталей.

Результати та їх обговорення

Проведені експериментальні дослідження засвідчили, що формування багатокомпонентного поверхневого шару суттєво змінює характер зношування деталей друкарських вузлів. Після поєднання пластичної деформації з нанесенням функціональних покриттів зафіксовано підвищення мікротвердості приповерхневого шару в середньому на 15–20% порівняно з вихідним станом. Одночасно відбулося зниження середнього коефіцієнта тертя, що позитивно вплинуло на тепловий режим контактних пар.

Аналіз профілометричних даних показав стабілізацію параметрів мікрогеометрії в процесі тривалої експлуатації. Інтенсивність зростання шорсткості зменшилась майже вдвічі, що свідчить про уповільнення деградації поверхневого шару. Для анілоксових валів встановлено збереження об'єму мікрокомірок у межах технологічного допуску протягом контрольного періоду роботи, що забезпечило рівномірність фарбоперенесення.

Рентгеноструктурний аналіз підтвердив формування стискаючих залишкових напружень, які перешкоджають розвитку мікротріщин. У результаті ресурс формних циліндрів у зоні затиску збільшився більш ніж удвічі. Порівняння експлуатаційних показників до і після модернізації продемонструвало зменшення коефіцієнта зносу в середньому у 1,7 раза.

Отримані результати свідчать, що комплексна технологічна схема не лише покращує окремі механічні характеристики, а й формує стабільний функціональний стан поверхні в умовах циклічного контактного навантаження. Це підтверджує доцільність застосування інтегрованого підходу для підвищення довговічності друкарського обладнання.

Висновки

Дослідження показало, що інтеграція методів пластичної деформації із нанесенням функціональних шарів створює більш рівномірний розподіл контактних навантажень і знижує максимальні значення локальних напружень. Результатом стає зменшення інтенсивності зношування та гальмування процесів утворення точкових пошкоджень на поверхні. Стабільна мікрогеометрія контролює фактичну площу взаємодії елементів і обмежує виділення теплоти в робочій зоні. Поверхневий шар функціонує в умовах сповільненого

руйнування, що безпосередньо визначає термін надійної роботи механізмів.

Експериментально підтверджено, що комбінація локального підвищення твердості з цілеспрямованим створенням залишкових напружень стиску збільшує стійкість до контактної втоми та корозійного руйнування під навантаженням. Зниження показника концентрації напружень у ділянках фіксації та взаємодії елементів зменшує ризик ініціювання тріщин і забезпечує стабільність геометричних параметрів компонентів.

Встановлено, що багатошарова функціональна архітектура поверхні створює комплексний ефект підвищення міцності, захисту від зовнішніх впливів та стабілізації характеристик тертя. Зменшення коефіцієнта тертя і постійності мікрорельєфу знижують рівень вібрацій і температурні флуктуації в контактних з'єднаннях. Збереження форми робочих елементів, включаючи поверхні з контрольованою мікроструктурою, забезпечує незмінність технологічних характеристик друку впродовж тривалого періоду використання.

Перелік використаних джерел

- [1] Recent advances in additive manufacturing: A review of current developments and future directions / Ben Said L., Ayadi B., Alharbi S., Dammak F. *Machines*. 2025. Vol. 13. No. 9. Article 813. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13090813>.
- [2] Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences. *Academy Review*. 2023. Vol. 2, no. 59. Pp. 75-89. DOI: <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5>.
- [3] The impact of plasma surface treatments on the mechanical properties and magnetic performance of FDM-printed NdFeB/PA12 magnets / A. Damjanović et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 10. Article 2275. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17102275>.
- [4] Hashmi A. W., Mali H. S., Meena A. A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2023. Vol. 29, no. 3. Pp. 504-532. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0133>.
- [5] Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities / Maleki E., Bagherifard S., Bandini M., Guagliano M. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 37. Article 101619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101619>.
- [6] Kanishka K., Acherjee B. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 89. Pp. 220-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034>.
- [7] Zyhulia S., Barauskiene O. Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders. *Eastern-European Journal of Enterprise*

- Technologies*. 2019. Vol. 99, no. 3. Pp. 22-28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171808>.
- [8] Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach / V. Makedon et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 128, no. 2. Pp. 47-57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
- [9] Гаращенко Я. М. Удосконалення технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів. Харків, 2023. 388 с.
- [10] Sharma K. A modernization procedure for the maintenance of printing machinery. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, no. 5. Pp. 491-495.
- [11] Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment / Kepka M., Zetek M., Zetková I., Bakir Y. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 54. Pp. 59-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056>.
- [12] Rassokhin D. O., Nosovska O. V., Kokodey D. V. Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 170-176. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300054>.
- [13] Hashmi A. W., Mali H. S., Meena A. The surface quality improvement methods for FDM printed parts: A review. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Springer. 2021. Pp. 167-194. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_9.
- [14] Corrosion behavior of steel parts repaired using additive manufacturing: Overview and research perspective / Furbino M., Del Olmo R., Revilla R. I., De Graeve I. *Materials & Design*. 2025. Vol. 252. Article 113769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113769>.
- [15] Post-processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing / M. A. Mahmood et al. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 1. Article 77. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12010077>.
- [16] Surface treatment and analysis of 3D-printed plastic molds for prototype and small-series injection molding / Raz K., Chval Z., Hula F., Markopoulos A. *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 22. Article 2977. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17222977>.
- [17] Liu H., Xiao F., Gao Y. SiC powder binder jetting 3D printing technology: A review of high-performance SiC-based component fabrication and applications. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 12. Article 6488. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15126488>.

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION OF COMBINED SURFACE TREATMENT TECHNOLOGIES FOR CRITICAL PRINTING EQUIPMENT COMPONENTS TO EXTEND THEIR SERVICE LIFE

Zenkin M.A.

D.Sc. (Engineering), professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>, e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net;

Remezovskyi O.M.

postgraduate student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6064-9876>, e-mail: remez2024@outlook.com

The aim of the study is to enhance the operational stability and durability of critical printing equipment components through the implementation of combined surface strengthening and restoration technologies. The focus is placed on printing cylinders, plate cylinders, and anilox rollers operating under cyclic contact loading, intensive friction, and exposure to ink and dampening systems. The investigation was conducted under real production conditions using profilometric control, microhardness measurements, evaluation of the wear coefficient k , friction coefficient μ , and residual stresses σ_{res} . The results confirmed that the combination of surface plastic deformation and functional coatings forms a stable near-surface layer with increased resistance to contact fatigue and abrasive wear. After the implementation of combined technologies, the wear coefficient decreases by 1.6–1.9 times. The Ra parameter remains within the specified tolerance over a longer operating period, ensuring stable contact and uniform ink transfer. Compressive residual stresses in the near-surface layer reduce the rate of microcrack propagation and improve the cyclic durability of the components. For anilox rollers, preservation of cell volume with a deviation not exceeding 3% over 1000 operating hours was established. This guarantees consistent ink delivery and eliminates print streaking. For plate cylinders, the service life of clamping zones increases more than twofold. A reduction of the friction coefficient by 20–25% leads to lower heat generation in the contact zone and stabilization of the machine's dynamic parameters. The practical significance of the study lies in the development of a controlled technological scheme for surface restoration without altering the design of machine units. The results enable prediction of component service life based on measurable microgeometric and tribological parameters. The proposed approach ensures extension of maintenance intervals and improvement of printing equipment reliability during long-term production cycles.

Keywords: combined surface strengthening; printing cylinders; surface wear resistance; contact fatigue; residual stresses; tribological characteristics; service life extension.

References

- [1] L. Ben Said, B. Ayadi, S. Alharbi, and F. Dammak, "Recent advances in additive manufacturing: A review of current developments and future directions," *Machines*, vol. 13(9), article 813, 2025. doi: [10.3390/machines13090813](https://doi.org/10.3390/machines13090813).
- [2] V. V. Makedon, O. H. Kholod, and L. I. Yarmolenko, "The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences," *Academy Review*, vol. 2(59), pp. 75–89, 2023. doi: [10.32342/2074-5354-2023-2-59-5](https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5).
- [3] A. Damjanović, G. Primc, R. Zaplotnik, M. Mozetič, and N. Kovačević, "The impact of plasma surface treatments on the mechanical properties and magnetic performance of FDM-printed NdFeB/PA12 magnets," *Materials*, vol. 17(10), article 2275, 2024. doi: [10.3390/ma17102275](https://doi.org/10.3390/ma17102275).
- [4] A. W. Hashmi, H. S. Mali, and A. Meena, "A comprehensive review on surface quality improvement methods for additively manufactured parts," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 29(3), pp. 504–532, 2023. doi: [10.1108/RPJ-06-2021-0133](https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2021-0133).
- [5] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, and M. Guagliano, "Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities," *Additive Manufacturing*, vol. 37, article 101619, 2021. doi: [10.1016/j.addma.2020.101619](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101619).
- [6] K. Kanishka, and B. Acherjee, "A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 89, pp. 220–283, 2023. doi: [10.1016/j.jmapro.2023.01.034](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.034).
- [7] S. Zyhulia, and O. Barauskiene, "Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3(12 (99)), pp. 22–28, 2019. doi: [10.15587/1729-4061.2019.171808](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171808).
- [8] V. Makedon, V. Myachin, O. Plakhotnik, N. Fisunen, and O. Mykhailenko, "Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 128(2), pp. 47–57, 2024. doi: [10.15587/1729-4061.2024.300796](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796).
- [9] Ya. M. Harashchenko, *Udoskonalennia tekhnologichnoi pidgotovky adyutivnoho vyrobnytstva skladnykh vyrobiv: monohrafiia* [Improving technological preparation of additive manufacturing of complex products: monograph]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. (Ukr.)
- [10] K. Sharma, "A modernization procedure for the maintenance of printing machinery," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4(5), pp. 491–495, 2017.
- [11] M. Kepka, M. Zetek, I. Zetková, and Y. Bakir, "Applications of additive technologies in the maintenance of machinery and equipment," *Procedia Structural Integrity*, vol. 54, pp. 59–66, 2024. doi: [10.1016/j.prostr.2024.01.056](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.056).
- [12] D. O. Rassokhin, O. V. Nosovska, and D. V. Kokodey, "Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing," *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section Technical Sciences*, vol. 47, pp. 170–176, 2023. doi: [10.31498/2225-6733.47.2023.300054](https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300054).
- [13] A. W. Hashmi, H. S. Mali, and A. Meena, "The surface quality improvement methods for FDM printed parts: A review," in *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, Springer, 2021, pp. 167–194. doi: [10.1007/978-3-030-68024-4_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_9).
- [14] M. Furbino, R. Del Olmo, R. I. Revilla, and I. De Graeve, "Corrosion behavior of steel parts repaired using additive manufacturing: Overview and research perspective," *Materials and Design*, vol. 252, article 113769, 2025. doi: [10.1016/j.matdes.2025.113769](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113769).
- [15] M. A. Mahmood, D. Chioibasu, A. Ur Rehman, S. Mihai, and A. C. Popescu, "Post-processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing," *Metals*, vol. 12(1), article 77, 2022. doi: [10.3390/met12010077](https://doi.org/10.3390/met12010077).
- [16] K. Raz, Z. Chval, F. Hula, and A. Markopoulos, "Surface treatment and analysis of 3D-printed plastic molds for prototype and small-series injection molding," *Polymers*, vol. 17(22), article 2977, 2025. doi: [10.3390/polym17222977](https://doi.org/10.3390/polym17222977).
- [17] H. Liu, F. Xiao, and Y. Gao, "SiC powder binder jetting 3D printing technology: A review of high-performance SiC-based component fabrication and applications," *Applied Sciences*, vol. 15(12), article 6488, 2025. doi: [10.3390/app15126488](https://doi.org/10.3390/app15126488).

Стаття надійшла 04.02.2026

Стаття прийнята 28.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Зенкін М. А., Ремезовський О. М. Наукове обґрунтування комбінованих технологій обробки поверхонь відповідальних деталей друкарського обладнання для подовження їх ресурсу. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 178–187. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359807>.