

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**ПЕТРО КИРИЧОК
СВІТЛАНА ЗИГУЛЯ
ОКСАНА БАРАУСКЕНЕ**

КОМПЛЕКСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

МОНОГРАФІЯ

Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023**

УДК 681.6.06:681.62: 655.1:655.344
К37

*Рекомендовано Вченою радою
Національного технічного університету
України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"
(Протокол № 6 від 05.06.2023)*

Рецензенти: *В. С. Ловейкін*, зас. діяч науки і тех., д-р техн. наук, проф.
Національний університет біоресурсів і природокористування

С. Ф. Гавенко, д-р техн. наук, проф.
Українська академія друкарства

Киричок П. О.

К37 Комплексні технології обробки деталей поліграфічного обладнання : монографія / П.О. Киричок., С. М. Зигуля, О. І. Бараускене. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, В-во «Політехніка», 2023. — 137 с. : 105 рис., 17 табл.

ISBN 978-966-990-079-1

У монографії висвітлені теоретичні та практичні засади технологічного забезпечення якості та експлуатаційних властивостей циліндричних деталей поліграфічних машин. Описані класифікаційні ознаки методів поверхнево пластичного деформування та визначений взаємозв'язок між процесом виготовлення деталей та параметрами якості поліграфічної продукції, а також встановлено аналітичні залежності між режимами обробки процесу вібраційного накатування і геометричними параметрами мікрорельєфу.

У роботі було застосовано модель впливу технологічних параметрів під час виготовлення деталей комплексною технологією на інтенсивність зношування, модель впливу якісних й експлуатаційних параметрів поверхні деталей на якість поліграфічної продукції при офсетному друці, модель напружено-деформованого стану поверхневого шару при зміцненні поверхні.

На основі експериментальних досліджень якості поверхні було визначено параметри мікрогеометрії поверхні, її фізико-механічні властивості, геометричні розміри друкарського циліндра після оздоблювально-зміцнюючої обробки. А також були проведені дослідження зносостійкості та корозійної стійкості циліндричних деталей поліграфічного обладнання.

Для науковців, аспірантів, фахівців-практиків поліграфічної промисловості та студентів вищих навчальних закладів.

ISBN 978-966-990-079-1

© П. О. Киричок, С. М. Зигуля, О. І. Бараускене 2023
© КПІ ім. Ігоря Сікорського (НН ВПІ)

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
	ВСТУП	7
1.	РОЗДІЛ 1 Аналіз сучасних методів підвищення якості і експлуатаційних властивостей деталей поліграфічного устаткування	11
1.1.	Надійність роботи поліграфічного устаткування	11
1.2.	Аналіз зношування циліндричних деталей поліграфічного устаткування, як об'єкт досліджень	15
1.3.	Підвищення якості і зносостійкості деталей при утворенні на поверхні регулярного мікрорельєфу	18
2.	РОЗДІЛ 2 Теоретичне підґрунтя формування параметрів якості і експлуатаційних властивостей при застосуванні комплексних технологій	34
2.1.	Взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу та якістю виготовлення поліграфічної продукції	34
2.2.	Вплив режимів обробки комплексних технологічних процесів на геометричні параметри мікрорельєфу	37
3.	РОЗДІЛ 3 Моделювання впливу технологічних параметрів на якісні показники при застосуванні комплексної технології	50
3.1.	Моделювання впливу технологічних параметрів на якісні показники при виготовленні деталей комплексною технологією на інтенсивність зношування	50
3.2.	Моделювання впливу технологічних параметрів на якість поліграфічної продукції	60
3.3.	Моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару при зміцненні поверхні	76
4.	РОЗДІЛ 4 Дослідження поверхонь деталей оброблених при комплексних технологіях обробки	88
4.1.	Експериментальні дослідження мікрогеометрії поверхні	89
4.2.	Експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик поверхні	93
4.3.	Експериментальні дослідження структури поверхневого шару	101
4.4.	Експериментальні дослідження геометричних параметрів циліндричних деталей	107

4.5.	Контроль якості покриття	109
5.	РОЗДІЛ 5 Дослідження експлуатаційних властивостей поверхонь циліндричних деталей	111
5.1.	Дослідження зносостійкості	111
5.2.	Дослідження корозійної стійкості	117
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	123
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	125

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

РМР – регулярний мікрорельєф;

ОЗО – оздоблювально-зміцнювальна обробка;

ПМП – противідмарювальна металева пластина;

ППД – поверхнєве пластичне деформування;

ПРМР – повністю регулярний мікрорельєф;

ЧРМР – частково-регулярний мікрорельєф;

A – амплітуда неперервної регулярно розташованої нерівності (осциляцій деформувального елемента), мм;

a – товщина покриття (хрому), мм

b – ширина нерівності після нанесення ЧРМР вібраційним накатуванням, мм;

b_1 – ширина нерівності після комплексного технологічного процесу, мм;

D_k – густина струму, А/дм²;

d_3 – діаметр заготовки, мм;

E – модуль пружності, МПа;

e – ексцентриситет деформувального інструмента, мм;

f – коефіцієнт тертя;

$T_{оп}$ – відносна опорна площа поверхні після вібраційного накатування, %;

F_H – відносна опорна площа поверхні після вібраційного накатування, %

F_{H1} – відносна опорна площа поверхні після комплексної технології, %

h – висота (глибина) нерівності після нанесення мікрорельєфу вібраційним накатуванням, мм;

h_1 – висота (глибина) нерівності після комплексного технологічного процесу, мм;

$H_{во+хр}$ – мікротвердість після комплексної технології, МПа;

$H_{осн.}$ – мікротвердість основи, МПа;

$H_{хш}$ – мікротвердість хромованого шару, МПа;

НВ – твердість матеріалу за Брінеллем;

НРС – твердість матеріалу за Роквеллом;

НV – твердість матеріалу за Вікерсом;

i – відношення величини подвійних ходів деформуючого інструмента $n_{\text{подв.х}}$, до частоти обертання шпинделя $n_{\text{шп}}$;

I – лінійний знос, кг/м^2 ;

$I_{\text{хр}}$ – струм при хромуванні, А;

$I_{\text{акт}}$ – струм активації, А;

$n_{\text{подв.х}}$ – частота осциляцій інструмента, подв.х/хв.;

$n_{\text{шп}}$ – частота обертання шпинделя, об/хв.;

P – зусилля вдавлювання, Н;

R – радіус деформувального інструмента, мм;

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм;

R_z – висота нерівностей профілю по десяти точкам;

S – подача, мм/об;

S_k – кутовий крок нерівностей, мм;

S_o – осьовий крок нерівностей, мм;

$t_{\text{хр}}$ – час хромування, год;

$t_{\text{акт}}$ – час активації;

α – кут сітки;

δ – відносне подовження, %;

Θ – кут напряду нерівностей;

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя плинності, МПа;

σ_B – границя міцності, МПа;

Ψ – відносне звуження.

ВСТУП

Якість поліграфічної продукції залежить від параметрів (характеристик) якості поверхні і поверхневих шарів деталей, окремих вузлів та механізмів друкарського обладнання. На експлуатаційні характеристики та стабільність роботи машин впливають технологічні особливості їх виготовлення, що ґрунтуються на процесах обробки поверхонь, зокрема, методами пластичного деформування [1].

Окрім традиційних методів виготовлення деталей застосовують особливі технічні прийоми, такі як комплексна технологія електроіскрового та лазерного легування з наступним азотуванням [2], динамічні методи поверхнево-пластичного деформування [3], холодна та піскоструминна обробка [4], комбіновані види обробки [5] тощо.

Стійкість роботи циліндричних деталей з використанням традиційних технологій виготовлення не задовольняє сучасних потреб поліграфічного виробництва. І це пов'язано із впливом агресивного середовища (фарб, зволожувальних розчинів, змивних речовин, противідмарювальних порошків тощо), що викликає інтенсивну корозію на поверхні циліндра. Тому питання, пов'язані зі збільшенням довговічності друкарського циліндра із застосуванням різних технологічних заходів, є актуальним завданням [6].

На жаль, тепер бракує інформації про застосування комплексних технологічних впливів, що поєднують як механічні, так і фізичні, фізико-хімічні та хіміко-термічні технології обробки. Відомо, що окремі технологічні прийоми, спрямовані на покращення експлуатаційних властивостей деталей обладнання, все ж застосовують під час обробки поверхні. Так, у роботі [7] розглянуто комплексну технологію поєднання оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхні, що полягає у формуванні часткового регулярного мікрорельєфу з твердим хромуванням з термічною або електротермічною обробкою.

Утім, поєднання таких методів досліджено недостатньо, тому потрібно проводити всебічні теоретичні дослідження й експериментальні розробки. Це підтверджує актуальність обраного напрямку дослідження.

Вирішення питання покращення експлуатаційних властивостей, стабільності процесу друкування становить не тільки науковий, але й практичний інтерес. Це істотно підвищить якість, надійність і довговічність деталей поліграфічних машин, а відтак і якість поліграфічної продукції.

Основними складовими друкарської машини є циліндричні деталі, які забезпечують надійну роботу обладнання і стабільний перебіг технологічного процесу. Вихід їх з ладу зупиняє процес виготовлення продукції і спричиняє великі фінансові втрати.

В літературних джерелах, патентах на винаходи [8, 9, 10] висвітлено різні методи підвищення надійності та довговічності машин, спрямовані на покращення експлуатаційних властивостей (у тому числі – поверхневого зміцнення), які ґрунтуються на процесах обробки поверхонь:

- зміцнення з утворенням плівки на поверхні;
- зміцнення зі зміною хімічного складу поверхневого шару металу;
- зміцнення зі зміною енергетичного запасу поверхневого шару;
- зміцнення зі зміною структури поверхневих шарів;
- зміцнення зі зміною шорсткості поверхні;
- зміцнення структури всього об'єму металу.

Одним із перспективних напрямів поверхневого зміцнення є поверхнево-пластичне деформування, яке широко застосовують у поліграфічній галузі [11].

Між тим, використання кожного з цих методів має певні обмеження в умовах поліграфічного виробництва, більше того, слід враховувати специфіку процесів друкування та післядрукарської обробки поліграфічної продукції.

Якість поліграфічної продукції залежить від якості поверхні і поверхневого шару друкарського циліндра, яка може бути підвищена за рахунок додаткової механічної обробки поверхневим пластичним деформуванням з утворенням регулярного мікрорельєфу [12]. Утворення регулярного мікрорельєфу (РМР) на поверхні сприяє покращеному контакту з металевою пластиною, яка слугує захистом циліндра від корозії, відмарювання.

Дослідженнями технології поверхнево-пластичного деформування (ППД) встановлено, що формування на поверхні регулярного мікрорельєфу підвищує зносостійкість деталей у 1,2...1,4 рази [13]. Формування часткового регулярного мікрорельєфу у порівнянні зі шліфованими поверхнями, підвищило зносостійкість – у 1,5...2 рази [14].

У роботі [15] розглянуто, вплив механічної обробки на експлуатаційні властивості поверхонь, і виявлено, що від режимів обробки великою мірою залежать їх шорсткість, мікротвердість та корозійна стійкість. Проведені авторами дослідження показують – після механічної обробки збільшуються опір втомі, а також твердість, оброблюваної поверхні.

Однак слід зазначити, що в зазначеній роботі не наведено умов формування часткового чи повністю регулярного мікрорельєфу гексагонального типу на деталях циліндричної форми, не розглянуто обробку деталей складної форми і не досліджено вплив ППД на експлуатаційні властивості друкарського циліндра.

Важливі питання якості поверхонь є дослідження геометричних параметрів циліндричних деталей, про що свідчить робота [13]. Через технологічні особливості механічної обробки виникають ускладнення у прогнозуванні режимів обробки для отримання якісних параметрів поверхневого шару, оскільки вибір режимів формування мікрорельєфу великою мірою залежить від властивостей матеріалу оброблювальної поверхні. Для вирішення цієї проблеми в роботі [16] досліджено вплив технології обробки ППД на параметри якості поверхневого шару. Показано, що зносостійкість поверхні залежить від режимів обробки. Найбільший вплив на якість поверхні має зусилля вдавлювання і радіус деформувального інструмента.

Незважаючи на практичну значущість наведених результатів, вплив механічної обробки на експлуатаційні властивості обладнання достатньою мірою не розглянуто, а також бракує відомостей щодо впливу обробки вібраційним накатуванням поверхонь деталей на якість поліграфічної продукції.

Утім, вказаних вище методів обробки не достатньо для підвищення надійності і довговічності поверхні циліндрів, а відтак не може бути стабільною робота обладнання, і як наслідок, не можуть бути стабільними параметри якості продукції.

Зазначене являє собою наукову технічну проблему, одним із способів вирішення якої є застосування комплексного підходу на фінішних операціях, що поєднує метод утворення регулярного мікрорельєфу з наступним хромуванням поверхні.

Доцільність хромування оброблених поверхонь підтверджується його захисними властивостями – здатністю до корозійної, хімічної, ерозійної стійкості, а також підвищенням експлуатаційних властивостей деталей, які працюють в умовах високого зносу [14].

На думку авторів [17], процес хромування після механічної обробки поверхні помітно підвищив мікротвердість, зносостійкість і корозійну стійкість порівняно із грубозернистим зразком.

Вплив режимів хромування на експлуатаційні властивості описано в [18]: експериментально було визначено, що високих критичних навантажень та значних показників зчеплення досягають за рахунок утворення на хромованій поверхні більш щільної фази $(Cr, Fe)_2N_{1-x}$. Між тим цей висновок не підтверджено відповідними

експериментальними результатами дослідження впливу хромованої поверхні на експлуатаційні властивості деталей після утворення регулярного мікрорельєфу поверхневим пластичним деформуванням.

Недостатня визначеність впливу технологічних режимів обробки поверхневим пластичним деформуванням поверхні з наступним хромуванням обумовлена необхідністю застосування комплексного технологічного процесу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

З розвитком сучасного виробництва питання підвищення продуктивності виробництва та якості поліграфічної продукції є актуальним.

Одним з ефективних способів підвищення якості деталей поліграфічного устаткування, продуктивності виробництва, надійності і довговічності є використання методів поверхневого пластичного деформування (ППД), що можуть бути застосовані з багатофункціональними композиційними покриттями на фінішних операціях, з-поміж яких виділяють зносостійке покриття.

У наш час, як один із методів ППД, широко використовують вібраційну оздоблювально-зміцнювальну технологію. Це обгрунтовується її широкими технічними і технологічними можливостями, а також техніко-економічними показниками. Вібраційну оздоблювально-зміцнювальну технологію активно й багатосторонньо використовують у різних галузях виробництва і на сьогодні спостерігається тенденція до розширення її застосування. Актуальними є поєднання хімічних і гальванічних методів нанесення покриттів, напилення, іонна плазмова обробка, наплавлення, лазерне зміцнення разом із застосуванням оздоблювально-зміцнювальних технологій. Забезпечити підвищення якості поверхні та експлуатаційних властивостей деталей можна завдяки поєднанню оздоблювально-зміцнювальної обробки (ОЗО) і наступного хромування.

1.1. Надійність роботи поліграфічного устаткування

Інформацію про відмови у роботі поліграфічного устаткування, про термін служби деталей, вузлів або механізмів, а також про трудомісткість їх поточних або капітальних ремонтів отримано на основі літературних і інформаційних джерел, патентного пошуку, а також аналізу матеріалів з видавничо-поліграфічних підприємств м. Києва. Така інформація дозволила оцінити умови роботи, технічного обслуговування і ремонту поліграфічного устаткування, тобто ефективність організації процесу експлуатації техніки. Специфіку роботи поліграфічного устаткування регламентує система стандартів, а саме: ДСТУ ІЕС 60706-2:2008 Ремонтопридатність устаткування. Частина 2. Вимоги до ремонтпридатності та дослідження на етапі проектування та конструювання тощо [19].

Джерелами інформації з підприємств обрані первинні та зведені технологічні карти, звітні й технологічні документи інженерних підрозділів, що здійснюють ремонт деталей і технічне обслуговування обладнання. Під час оцінювання надійності деталей використано первинну звітність у вигляді журналів напрацювань, пошкоджень і відмов (у разі наявності). У цих журналах містяться відомості про режими та інші умови експлуатації деталей з уточненням характеру відмови під час роботи поліграфічного устаткування. Нині на більшості підприємств використовують перелік видів відмов та оцінок показників надійності деталей, який був встановлений для всіх галузей машинобудування, відповідно до стандартів, які втратили чинність, однак на деяких підприємствах видавничо-поліграфічної галузі майже не ведуться систематичні роботи щодо збирання й оброблення такої інформації [20].

На підставі аналізу документації інженерних і технологічних відділів, ремонтних цехів підприємств видавничо-поліграфічної галузі виявлено інформацію про відмови поліграфічного устаткування, трудомісткість їх ремонту, про термін служби окремих деталей, вузлів і механізмів. Проведений аналіз відмов поліграфічного устаткування можна поділити на такі групи:

- механічні;
- електроніки й комп'ютерної техніки;
- електромеханічні в роботі обладнання;
- технологічні.

Механічні відмови виникають поступово або можуть бути спонтанними. Поступові відмови є результатом збільшення сил тертя в рухомих з'єднаннях, що спричиняє їх зношування. Спонтанні відмови виникають під дією навантаження (циклічного або ударного) і перевантаження, у разі порушення міцності зчеплення а також герметичності рухомих з'єднань.

Відмови електроніки й комп'ютерної техніки є різноманітними – наприклад, це можуть бути збої або відмова у роботі функціональних датчиків, що призводить до зміни оптичної густини друкарських відбитків у друкарському процесі, забруднення світло пропускних поверхонь оптичних контактів.

До **електромеханічних відмов** у роботі обладнання, які мають здебільшого постійний характер, належать іскріння в роботі електродвигуна, порушення зв'язку в системах регулювання частоти або швидкості обертання електропривода, злипання контактів реле, зниження опору ізоляції, зникнення контакту в реле й роз'ємах.

Технологічні відмови бувають дуже різними й характеризуються відхиленням параметрів якості технологічного процесу від їхніх еталонних, номінальних значень,

що призводить до випуску бракованої продукції. Технологічні відмови, зазвичай, є вторинними, оскільки виникають під час нормальної експлуатації або у процесі налагоджування машини [21, 22, 23].

На основі зібраних статистичних даних на підприємствах видавничо-поліграфічної галузі (які спеціалізуються на випуску газетної, книжково-журнальної, акцидентної, рекламної продукції, цінних паперів та документів суворого обліку, паковальної продукції тощо) виявлено причини браку, до яких відносять:

- порушення технологічної дисципліни;
- зношеність деталей, вузлів і механізмів поліграфічного устаткування (механічні відмови);
- відхилення властивостей матеріалу від нормативних;
- збої електромеханічного обладнання;
- недостатнє освітлення робочих місць;
- збої електроніки й комп'ютерної техніки;
- порушення кліматичних умов у цеху;
- інші причини.

За результатами виявлених причин браку розраховано співвідношення і побудовано діаграми для флексодрукарського обладнання (рис. 1.1), рулонного друкарського офсетного обладнання (рис. 1.2), аркушевого друкарського офсетного обладнання (рис. 1.3) і роботи післядрукарського обладнання (рис. 1.4).

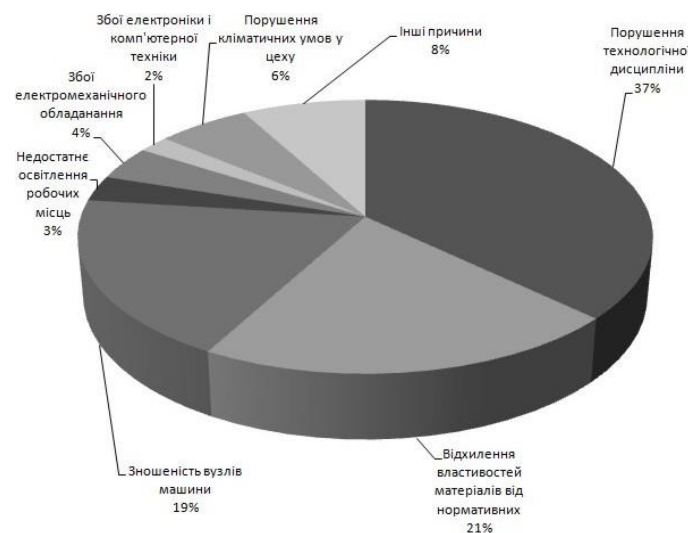


Рис. 1.1. Діаграма причин браку в роботі флексодрукарського обладнання

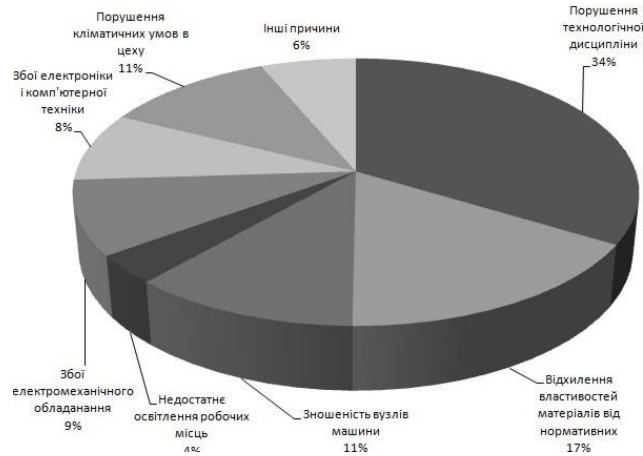


Рис. 1.2. Діаграма причин браку рулонного офсетного друкарського обладнання

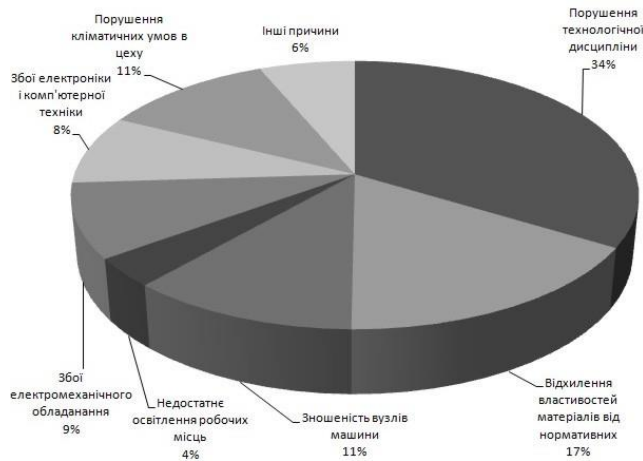


Рис. 1.3. Діаграма причин браку аркушевого офсетного друкарського обладнання

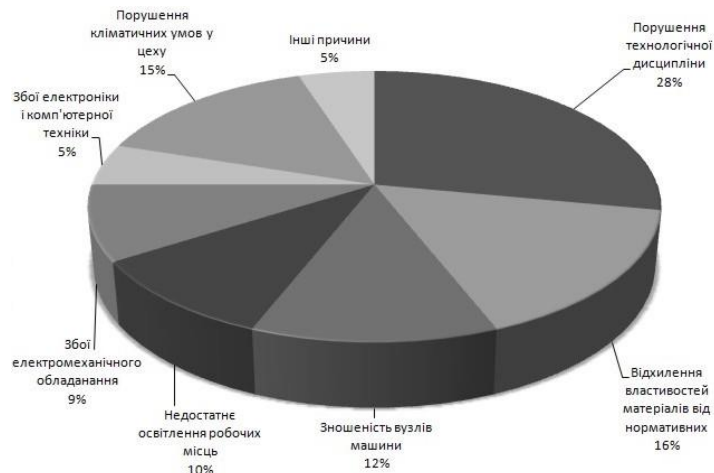


Рис. 1.4. Діаграма причин браку роботи післядрукарського обладнання

Відповідно до поданих на рис. 1.1–1.4 даних можна зробити висновок, що на першому місці є порушення технологічної дисципліни, а на другому – відхилення властивостей матеріалу від нормативних. Не менш важливим залишається брак поліграфічної продукції, спричинений зношуваністю деталей, вузлів і механізмів поліграфічного устаткування, і це є однією з актуальних задач, яку потрібно вирішити.

У поліграфічному устаткуванні значна частина вузлів та механізмів складається з деталей класу «тіла обертання». В аналізі причин браку акцентувалась увага також і на таких деталях (вали, втулки, кільця, диски тощо) через зношування їх зовнішньої циліндричної поверхні.

Отже, у процесі експлуатації поліграфічного устаткування у вузлах, механізмах і деталях відбувається зношування.

1.2. Аналіз зношування циліндричних деталей поліграфічного устаткування, як об'єкт досліджень

У процесі експлуатації поліграфічного устаткування під дією силових, температурних та інших факторів значному фізико-механічному впливу (тепловому, хімічному, механічному, магнітоелектричному тощо) піддається поверхневий шар деталей. Також фізико-механічні властивості поверхневого шару змінюються у процесі виготовлення деталей [24]. Отже, під час виготовлення деталей ставляться більш жорсткі вимоги до поверхневого шару, оскільки у більшості випадків спостерігається погіршення якості поверхні, а саме, з'являються ознаки зношування у приповерхневому шарі – корозія, ерозія, втомлювані тріщини, кавітація та інші види руйнування.

Проведено аналіз технологічного стану та ступеня зношеності циліндричних деталей друкарського обладнання, яке широко використовують на підприємствах видавничо-поліграфічної галузі. Технічний огляд обладнання, до якого належать машини фірм Heidelberg (Speedmaster SM 52, Speedmaster SM 74, GTO 46, GTO 52), KBA, MAN Roland, Mitsubish, Akiyama, Roland Praktica, Rondoset, Ryobi, PLAMAG, показав, що можна виділити деякі деталі класу «тіла обертання», до яких належать вали з пазами, втулки, букси й шийки циліндрів друкарських секцій (рис. 1.5), кришки ланцюгового транспортера, контактні кільця. Зношування відбувається переважно за рахунок нещільного контакту між циліндрами, між циліндром і противідмарювальною пластиною, що спричиняє потрапляння на циліндричні деталі зволожувального розчину, фарби, змивного розчину тощо. Потрапляння таких рідин, що є агресивним

середовищем, на циліндричні деталі призводить до появи корозії [25] і, як наслідок, до пошкодження їх поверхневого шару. Надалі таке зношування спричиняє брак друкерської продукції – через нього з'являються двоїння, дроблення, розтискування крапки та інші види браку.



а



б



в

Рис. 1.5. Деякі деталі зношування в друкарській секції друкарського обладнання:

а – друкарські циліндри; *б* – циліндри фарбового апарата;

в – противідмарювальні металеві пластини

У процесі експлуатації післядрукарського обладнання також здійснено аналогічний аналіз циліндричних деталей, які працюють в умовах посиленого зношування і до яких ставляться вимоги щодо підвищення експлуатаційних властивостей (табл. 1.1, рис. 1.6).

Таблиця 1.1

Деякі циліндричні деталі післядрукарського обладнання,
в яких виявлено зношування

№ з/п	Післядрукарське обладнання	Найменування деталей
1	Вкладально-швейно-різальний агрегат 735/4-5КТ	Двохкарданний вал Карданний вал Осі циліндричні Штовхач для загинання
2	Вкладально-швейно-різальний агрегат 745/1	Ексцентрикова втулка Виштовхувач Втулка (зовнішня) Осі циліндричні
3	Кришкоробний автомат Kolbus ДА-36	Вали шлицьові Втулки Шестерні Фланці
4	Лінії клейового безшвейного скріплення "Стар-Біндер"	Вали Втулка муфти перенавантаження Шийки валів
5	Лінія безшвейного скріплення "Ротор-Біндер РБ-5"	Вали Втулки Стакани Тяги
6	Компресор "Atlas Copco"	Поршень Диски Кільця Головка циліндра
7	Фальцювальні машини: - Multieffect 5090, 5071; - Guk K 54-4/KL	Осі (напівосі) з фланцями Втулки Кільця Фальцювальні вали Шийки валів подачі паперу



Рис. 1.6. Деякі циліндричні деталі післядрукарського обладнання,
в яких виявлене зношування

Зношування деталей класу «тіл обертання» виявилось у невідповідності форми, наприклад, еліпсність, зміні точності розмірів і обробки поверхневого шару, що спричиняє биття валу за рахунок нещільності посадки. Напруження та деформації призводять до прогину, згинання, скручування валів, циліндрів, що, у свою чергу, спричиняє нестабільне кріплення або послаблення деталей, тріщини або поломку.

Сучасне поліграфічне машинобудування висуває високі вимоги до матеріалів, технологій виготовлення і відновлення деталей, робота яких здійснюється у складних умовах. Номенклатура різних за призначенням виробів та умови роботи, в яких робочі функції виконують поверхневі зони металу (тоді як серцевинні зони несуть лише додаткові функції), безпосередньо не піддається зовнішньому впливу. До таких виробів можуть бути віднесені вироби, які підлягають ерозійному впливу середовища за низьких і високих температур; деталі, що працюють у середовищах, які викликають хімічну корозію; вироби, які працюють на втому (механічну, термічну, корозійну); деталі, що працюють в умовах високих температур; вироби, які працюють в умовах високого зносу [9].

Отже, головними завданнями технології на сучасному етапі, поряд з постійним удосконаленням процесів, що забезпечують точність розмірів і форм деталей, є створення нових та удосконалення наявних технологій виготовлення циліндричних деталей для надання матеріалу поверхневого шару необхідних функціональних властивостей (підвищення фізико-механічних властивостей, зносостійкості, корозійної стійкості), що дозволить забезпечити довговічність їх експлуатації [9].

1.3. Підвищення якості і зносостійкості деталей при утворенні на поверхні регулярного мікрорельєфу

Надійність та довговічність поліграфічного устаткування досягаються за рахунок отримання підвищення параметрів якості поверхні експлуатаційних властивостей деталей, які здійснюються на фінішних операціях, зокрема методами ППД [1]. Відомі технології, які ґрунтуються на зміцненні поверхневого шару циліндричних деталей, до яких належать хімічні, фізичні, фізико-хімічні, термічні, хіміко-термічні тощо [14].

Кожний із методів (або їх поєднання) має переваги й недоліки, а також певні обмеження в умовах експлуатації поліграфічного виробництва. Для розроблення технологічного процесу виготовлення циліндричних деталей потрібно звернути увагу на роботу у вузлах і механізмах (напруження і деформації, які відбуваються, процеси тертя і зношування, корозійну стійкість тощо), які виникають з урахуванням експлуатації друкарського і післядрукарського обладнання [26, 27, 28, 29].

Є низка технологічних процесів виготовлення деталей класу «тіл обертання», для підвищення якісних властивостей поверхонь, зокрема і їх зміцнення. На рис. 1.6 подано узагальнену класифікацію методів зміцнення поверхні металів:

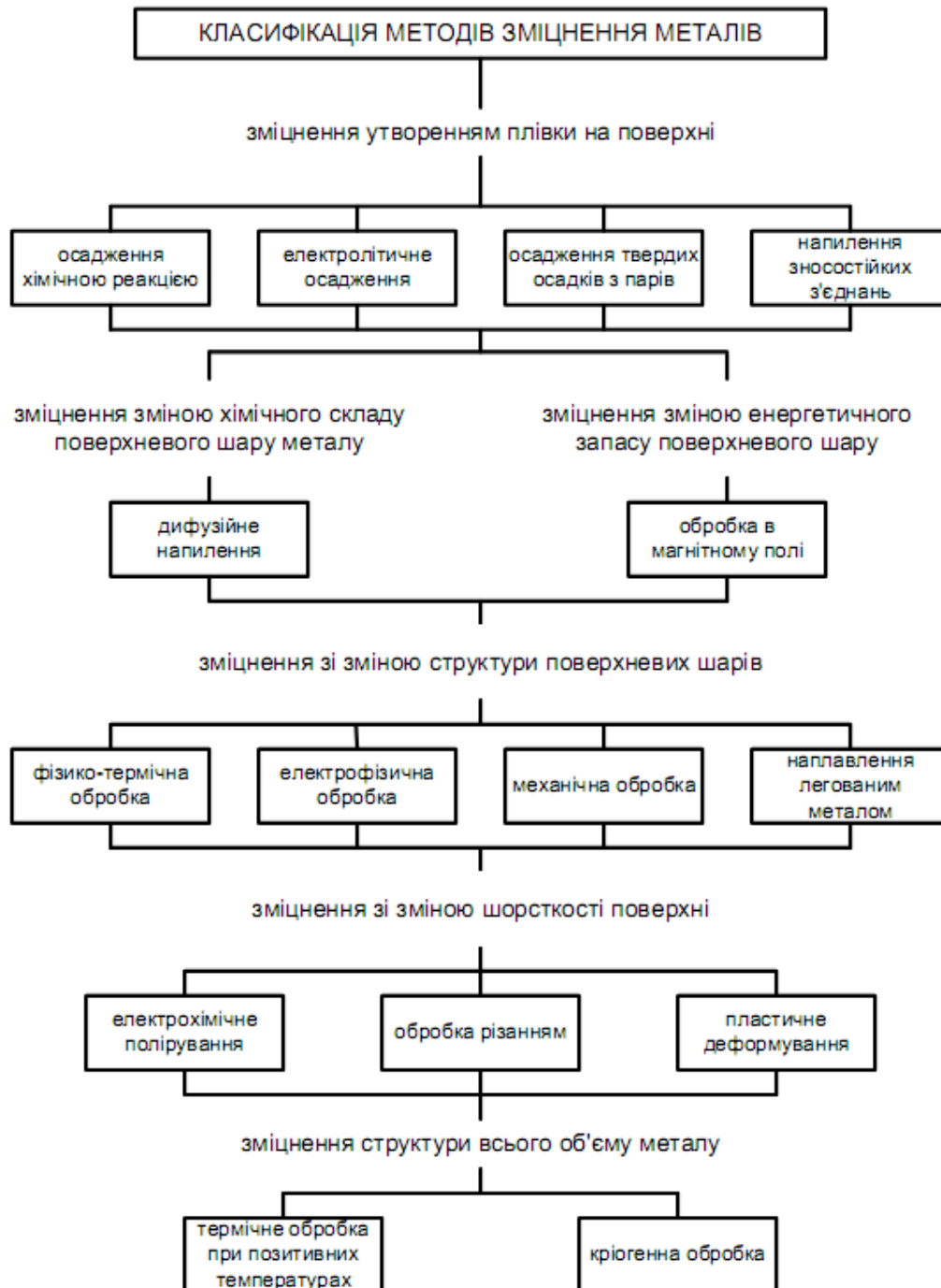


Рис. 1.6. Узагальнена класифікація методів зміцнення металів

– утворенням плівки на поверхні (осадження хімічною реакцією, електролітичне осадження, осадження твердих осадків з пари, напилення зносостійких з'єднань);

- зміною хімічного складу поверхневого шару металу (дифузійне напилення);
- зміною енергетичного запасу поверхневого шару (обробка в магнітному полі);
- зміною структури поверхневих шарів (фізико-термічна обробка, електрофізична обробка, механічна обробка, наплавлення легованим металом), зміною шорсткості поверхні (електрохімічне полірування, обробка різанням, пластичне деформування);
- зміною структури всього об'єму металу (термічна обробка під дією температур, криогенна обробка) [30, 1].

Відповідно до рис. 1.6 для зміцнення металів можна застосовувати метод ППД для обробки поверхонь різної геометричної форми: як зовнішніх, так і внутрішніх (плоских, циліндричних, конусних, сферичних, фасонних, зубчастих) [1].

На рис. 1.7 унаочнено класифікацію ППД залежно від призначення методу.

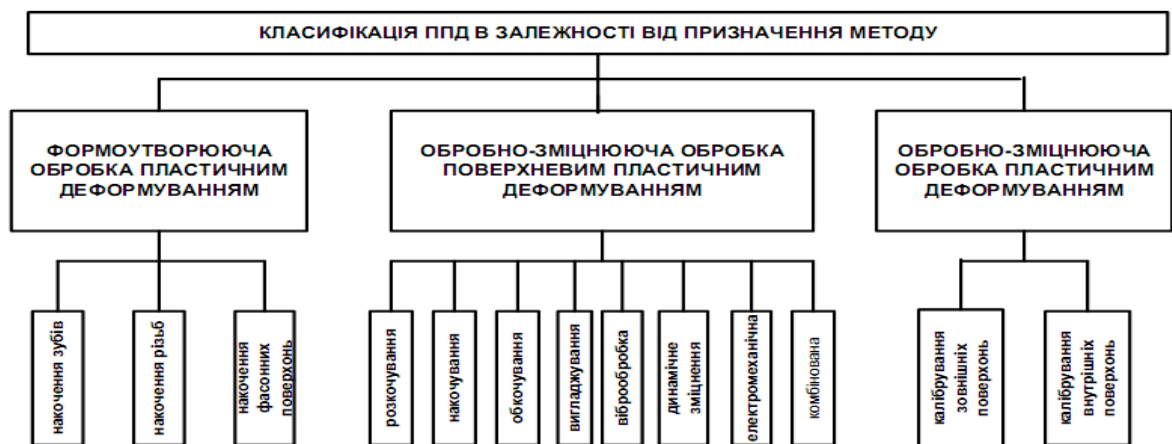


Рис. 1.7. Класифікація ППД залежно від призначення методу

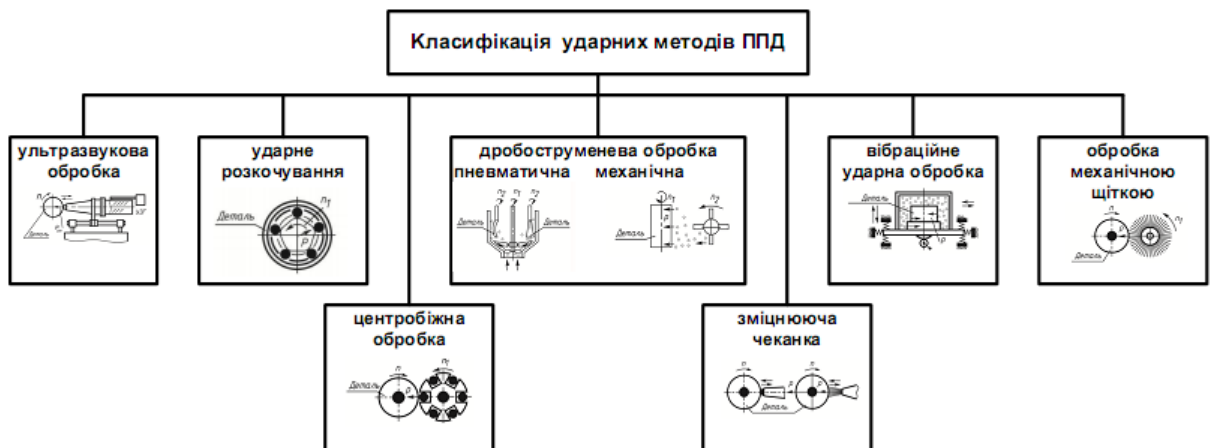
Основні методи ППД можна поділити на категорії (рис. 1.8), а саме на статичні та ударні. Основними методами ППД є:

- зміцнення розкочуванням;
- зміцнення обкочуванням;
- ударне розкатування;
- вібраційне обкочування;
- вібраційне накатування;
- вібраційне вигладжування;
- поверхневе дорнування;
- ультразвукова обробка;
- ударне розкочування;

- дробоструменева обробка;
- гідродробоструминна обробка;
- вібраційна ударна обробка;
- обробка механічними щітками
- центробіжна обробка;
- зміцнююча чеканка; [31, 32].



а



б

Рис. 1.8. Категорії основних методів ППД: а – статичні, б – ударні

Проаналізувавши методи зміцнення (рис. 1.6) та основні методи ППД (рис. 1.7, 1.8) можна виділити такі їх переваги:

1. Зміни в мікрогеометрії поверхні:

- зменшення шорсткості поверхні, в декілька разів, за один робочий хід;
- глибину зміцнення поверхневого шару за рахунок утворення мікрорельєфу.

2. Регулювання параметрів мікрорельєфу за рахунок зміни технологічних режимів або факторів (сприяє кращому маслоутворенню, зменшення зношуваності і корозії):

- ширини нерівностей, утворених за рахунок нанесення мікрорельєфу;

–глибини нерівностей;

–висоти напливів нерівностей мікрорельєфу [33].

3. Утворення дрібнозернистої структури-текстури у поверхневому шарі й збереження цілими волокон металу.

4. Плавне і стабільне підвищення мікротвердості поверхні.

5. Стабільність процесів як на термічно необроблених сталях, кольорових сплавах, так і на високоміцних матеріалах, при цьому зберігається вихідна форма заготовки.

6. Відсутність термічних дефектів.

7. Утворення сприятливих залишкових напружень стискання у поверхневому шарі.

Є також інші переваги методів ППД, що забезпечують підвищення зносостійкості, опору втомі, контактну витривалість та покращення інших експлуатаційних властивостей деталей на 20...50 %, а подеколи – у 2...3 рази (за умови вибору в кожному конкретному випадку найбільш раціонального методу і призначення оптимальних режимів обробки) [26, 34, 35].

Описані методи мають також і недоліки:

–немає можливості відновлювати деталі, які мають зношену поверхню; відновлювати деталі можна за рахунок поєднання методів ППД з хімічними і фізичними;

–низька продуктивність технологічного процесу виготовлення деталей;

–швидке зношування пристроїв або обладнання для здійснення обробки ППД (алмазні деформувальні елементи: шарики, ролики, вигладжувачі, вузли і механізми дробо- і піскоструминних апаратів тощо) [7, 36, 37].

Застосування основних методів обробки деталей поліграфічного устаткування ускладнює забезпечення регулярних геометричних властивостей через нерегулярний характер мікрорельєфу поверхні. Нерегулярний, хаотичний мікрорельєф не дозволяє керувати геометричними характеристиками якісного поверхневого шару, який потрібно враховувати під час виведення аналітичних залежностей, наприклад таких, як фактична поверхня контакту між деталями [33, 38].

Виникають складнощі з досягненням потрібної шорсткості, тому що пластична деформація є неоднорідною, і як наслідок, основні геометричні залежності між розмірами мікронерівностей і технологічними факторами є порушеними. Контроль якості мікрогеометрії поверхні є досить складним, оскільки спостерігаються зміни мікрорельєфу по всій поверхні деталі

Враховуючи викладене вище, можна зробити висновок про актуальність подальших досліджень у виготовленні деталей поліграфічного устаткування процесами ППД, які ґрунтуються на утворенні регулярного мікрорельєфу (РМР) по всій циліндричній поверхні, що забезпечить відповідну якість та експлуатаційні властивості [39].

Нині для утворення мікрорельєфу поверхні потрібної якості застосовують один із найпоширеніших методів ППД – вібраційне накатування. Актуальність цього методу пояснюється його широкими технологічними можливостями, а один з основних чинників – техніко-економічні переваги. Застосування технології вібраційного накатування в різних галузях виробництва є досить багатогранним та має тенденцію до розвитку. Завдяки цьому методу можна утворювати на циліндричних поверхнях різні види МР, що, у свою чергу, дозволяє розраховувати й нормувати геометричні параметри. Корелюючи режимами обробки можна утворювати МР різних видів, що забезпечує достатню точність параметрів мікрогеометрії поверхонь.

Особливістю вібраційного накатування є утворення на поверхні МР, що дає можливість забезпечити зменшення шорсткості поверхні, підвищити фізико-механічні властивості, корозійну стійкість, утворення стискувальних залишкових напружень першого роду, запобігання появи мікротріщин. Завдяки перерахованим можливостям поверхня стає менш чутливою до втомного руйнування [40, 41]

Актуальними і не розкритими повною мірою є дослідження, які стосуються поєднання механічних, гальванічних і хімічних методів нанесення покриттів, іонної імплантації, наплавлення, напилення, лазерної обробки з технологіями ППД.

До технології, які дозволяють збільшити експлуатаційні властивості циліндричних деталей відносять гальванічні процеси:

1) залізнення:

- у спокійному електроліті;
- у проточному електроліті;
- під дією постійного струму;
- під дією асиметричного струму;

2) нікелювання:

- розмірне;
- хімічне;
- електролітичне;

3) хромування:

- у спокійному електроліті;
 - у проточному електроліті;
 - під дією постійного струму;
- 4) електролітичне натирання цинком і залізо-цинковими сплавами;
 - 5) міднення;
 - 6) цинкування;
 - 7) кадрування;
 - 8) нанесення гальванополімерних покриттів.

Гальванічні покриття має такі переваги порівняно з деякими іншими способами:

- відсутність температурних деформацій;
- відсутність термічного впливу на деталь;
- виготовляти або відновлювати одночасно можна велику партію деталей. За рахунок цього зменшується собівартість і трудомісткість процесу;
- можливість отримання покриттів завтовшки від кількох десятків мікрометрів до 1...2 мм.

Недоліком цих технологій є дороговизна процесу та екологічні проблеми виробництва [42].

Найбільш поширеними гальванічними покриттями є залізнення, хромування, нікелювання – завдяки ним можна наносити рівномірні за товщиною покриття по всій поверхні, це, у свою чергу, дозволяє отримати покриття різної твердості та зносостійкості, при цьому не змінювати структуру металу деталі.

Залізнення має хороші техніко-економічні показники:

- вихідні матеріали й аноди – дешеві й недефіцитні;
- високий вихід металу за струмом – 85...95 %;
- продуктивність (швидкість осадження заліза) – 0,2...0,5 мм/год;
- товщина покриття – 0,8...1,2 мм;
- можливість у широких межах регулювати властивості покриттів (мікротвердість 1600...7800 МПа).

Нікелювання застосовують переважно для декоративних цілей і для захисту деталей від корозії, для виготовлення точних деталей складної форми і відновлення поверхонь деталей, які працюють за підвищених температур і тиску, за умов напівсухого тертя. Зазвичай на практиці застосовують такі покриття: нікель-мідь, мідь-нікель або мідь-нікель-хром.

Одним із найбільш поширених способів нанесення гальванічного покриття є хромування. За допомогою цього методу можна не тільки відновити розміри

зношених поверхонь деталей машин, але й підвищити зносостійкість. Хром має корозійну стійкість до багатьох солей, кислот, лугів. Так, сірка, слабка сірчана кислота, органічні кислоти, азотні кислоти та їх луги, смоли тощо на нього не діють. Хром є одним з елементів, після нанесення яких на поверхні деталі вдається отримати ряд важливих властивостей: високу твердість, корозійну та хімічну стійкість, термостійкість, зниження теплопровідності, низький коефіцієнт тертя, а також хороше зчеплення з основним металом.

Якість гальванічної обробки хромуванням та властивості хромового покриття залежать від застосовуваних технологічних режимів. Обираючи режим хромування для отримання покриття з потрібною характеристикою слід зважати на тісну залежність між температурою і щільністю струму. Під час вибору режимів хромування для отримання покриття з потрібною характеристикою потрібно враховувати на тісну залежність між температурою і щільністю струму [43].

Процес хромування вже використовують у поліграфічному машинобудуванні, зокрема для підвищення експлуатаційних властивостей [27]:

1) у друкарському офсетному обладнанні під час виготовлення:

- біметалевих офсетних форм;
- форм глибокого друку [44];
- клапанів аркушевої офсетної машини типу ПОЛ-71;
- анілоксових валів;
- валів для офсетних друкарських машин;
- рухомих планок автомата бокового рівня (аркушеві офсетні машини);
- фальцклапана рулонних машин;
- хромованих циліндрів;
- рельєфних хромованих циліндрів;
- кілець електромумфи головного приводу офсетної машини; проміжних валиків зволожувальних апаратів;
- стаканів розтирання фарб і систем зволоження;
- притискних планок формних циліндрів,

а також для відновлення дукторних валів і розтиральної системи та хромування матеріалів гідрофільних ділянок під час виготовлення поліметалевих друкарських форм методом травлення;

2) в обладнанні для високого друку:

- литих стереотипах;
- гальваностереотипах,

а також як матеріал для зміцнення поверхні друкарських форм, виготовлених гравіюванням або травленням;

3) в обладнанні для глибокого друку:

– як матеріал для зміцнення поверхні форм, які виготовлені електронним гравіюванням;

– як матеріал для зміцнення поверхні форм, які виготовлені травленням;

4) у післядрукарському обладнанні під час виготовлення:

– столів різальних машин;

– колінчастих валів вакуумного насоса (шийки) [45, 46].

Класифікують процес хромування за такими методами:

- твердий;
- рідкий;
- контактний
- безконтактний;
- газовий;
- комбінований [7, 47, 48, 49].

Хромування застосовують для виготовлення і відновлення деталей із чавуну, сталей, латуні, міді, алюмінію та його сплавів. Тверде хромування використовують для відновлення деталей, зношування яких не перевищує 0,2...0,3 мм на сторону. Основною метою твердого хромування для виготовлення деталей є захист їх поверхонь від корозії, який досягається за рахунок високої хімічної стійкості покриття. Також варто зазначити, що деталі, які мають хромоване покриття, мають значні зносостійкість і твердість. Між тим, крім високих фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, хромоване покриття має ще й захисне декоративне зачення [7].

Процес хромування має такі недоліки:

- зменшення міцності втоми деталей;
- зі збільшенням товщини покриття знижується міцність (гранична товщина шару хрому – 0,45...0,5 мм);
- припрацьованість гладкого хрому внаслідок високої твердості;
- погана маслоутримна здатність;
- унаслідок наявності в осадах хрому наскрізних тріщин маємо ненадійний захист основного металу від корозії.

Повному чи частковому усуненню зазначених недоліків сприяє застосування ППД для виготовлення і відновлення деталей. Так, наприклад, щоб підвищити маслоутримну

здатність та опір задирам після хромування можна наносити до хромування МР, що дозволить утворити маслoutримний рельєф у вигляді лунок і канавок [26]. Застосовуючи технології ППД, зокрема й вібраційне накатування перед нанесенням гальванічного покриття, можна повністю усунути шкідливий вплив покриття на деякі експлуатаційні властивості деталей. Також варто зазначити, що у наш час розроблено багато способів, інструментів та пристроїв для здійснення ППД [50].

На основі аналізу зношуваності циліндричних деталей було виявлено, що більшість із них працюють у важких умовах, спричинених високими швидкостями або вібраціями, і варто наголосити, що друкарські секції працюють в умовах агресивного середовища. Таким чином, запропоновано комплексний технологічний процес, який полягає у вібраційному накатуванні з наступним хромуванням, що дозволить підвищити ряд експлуатаційних характеристик, таких як зносостійкість, корозійна й ерозійна стійкість тощо, а також твердість та опір втомі.

Мета експериментальних досліджень зразків і деталей поліграфічного устаткування – підтвердити припущення про можливість підвищення надійності, якості, експлуатаційних властивостей роботи вузлів поліграфічного устаткування за допомогою застосування запропонованої комплексної технології обробки: вібраційного накатування з наступним хромуванням, а також перевірити запропоновані аналітичні залежності.

Одним з основних показників якості машини є надійність, яка суттєво залежить від експлуатаційних властивостей деталей і з'єднань робочих вузлів. На сьогодні залишається проблемою підвищення надійності машин, яку можна пов'язати із забезпеченням певних експлуатаційних властивостей деталей і з'єднань. Ці властивості певною мірою залежать від матеріалу заготовки і розмірної точності виготовлення деталей, а також якості їхніх робочих поверхонь (рис. 1.9) [51].

Надійність деталей та вузлів залежить переважно від стану їх поверхневого шару, оскільки руйнування починається безпосередньо у зовнішніх поверхнях.

Метою проведення експериментальних досліджень на зразках і деталях поліграфічного устаткування є підтвердження припущення про можливість підвищення якості поверхні, експлуатаційних властивостей у разі застосування запропонованої комплексної технології обробки: вібраційного накатування з наступним хромуванням, а також запропонувати аналітичні залежності.

З високою точністю прогнозувати показники якості поверхонь металів під впливом різних навантажень, коефіцієнтів тертя, деформацій, що виникають під час обертання та зношування поверхонь у процесі тертя, дуже важко, адже на сьогодні

немає теоретичних положень, які б могли посприяти у вирішенні цього завдання. Якщо розглядати теорію пластичного деформування, особливості взаємодії пар тертя, то вони лише ґрунтуються на таких припущеннях:

- деформування деталі під час обробки є мізерним;
- геометричні розміри циліндричних деталей мають бути абсолютно точними та багато інших.

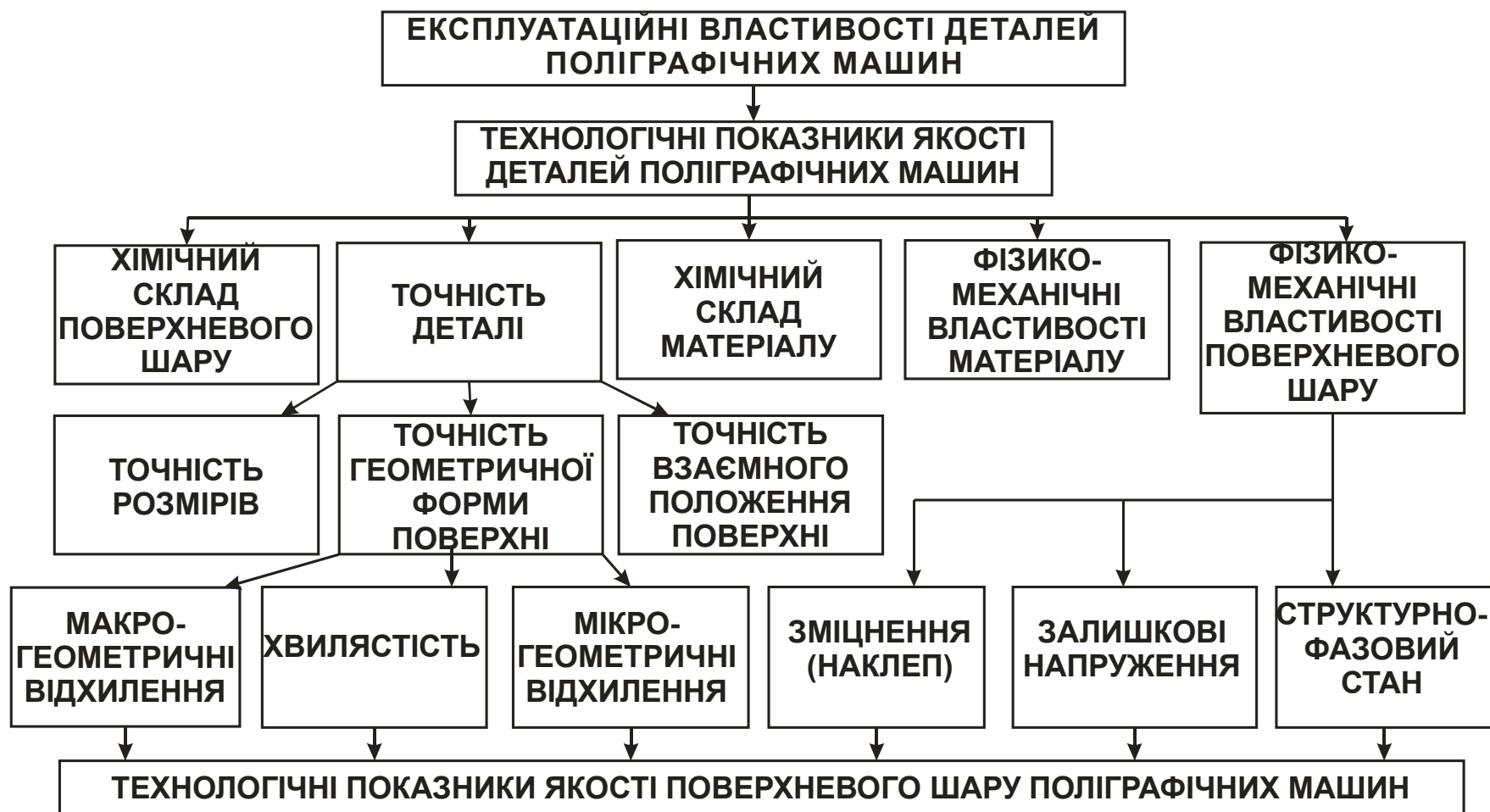


Рис. 1.9. Взаємозв'язок експлуатаційних властивостей з технологічними показниками якості поверхневого шару деталей поліграфічних машин

Для теоретичних досліджень комплексного технологічного процесу було застосовано методи системного аналізу, фундаментальні положення технології поліграфічного машинобудування, видавничо-поліграфічного виробництва, теорії пластичності та опору матеріалів, загальне і видавничо-поліграфічне матеріалознавства, основні положення теорії машин і механізмів.

В основу експериментальних досліджень покладено реалізацію методів для визначення експлуатаційних властивостей та основних параметрів, які безпосередньо впливають на якість поверхневого шару, а також встановлення їх взаємозв'язку з технологічними режимами. Основними критеріями для знаходження вибору технологічних параметрів для вібраційного накатування і наступного хромування є забезпечення якості поверхні циліндричних деталей та збільшення ресурсу їх роботи.

Оцінити збільшення ресурсу роботи на оригінальних деталях у поліграфічному устаткуванні дуже важко, тому дослідження виконувались на фрагментах деталей або спеціальних зразках, що, з одного боку, менш трудомістке завдання, але, з другого боку, вносить незначні похибки, які надалі можна визначити за відповідними критеріями.

Під час проведення експериментальних досліджень враховано теорію математичного планування експериментів для дослідження якісних характеристик, геометричних параметрів поверхневого шару, у процесі визначення інтенсивності зношування, корозійної стійкості. Використовували металорізальні верстати, розроблені стенди, також застосовували стандартні вимірювальні пристрої та офісні програми для аналізу й оброблення отриманих даних.

При проведенні експериментальних досліджень основну увагу було зосереджено на правильному виборі матеріалів, що залежить від багатьох чинників: довговічності й надійності конкретних деталей, які зношуються у процесі експлуатації, вимог до міцності, призначення особливостей вузла тертя, умов експлуатації, рівня розвитку технології виробництва тощо [52].

Під час аналізу деталей на видавничо-поліграфічних підприємствах було визначено, що деталі типу «тіл обертання» мають переважно діаметр від 5 до 400 мм і довжину від 25 до 1000 мм, також було виділено інші деталі поліграфічного устаткування, які потребують відновлення контактної поверхні, що були оброблені за різними технологіями або за різними режимами. Деталі відповідали таким вимогам:

- відносне відхилення від перпендикулярності осі відносно торців – не більше ніж 16 мкм;

- граничне відхилення форми циліндричної поверхні: овальність – не більше 6 мкм;
- граничне значення торцевого биття – не більше ніж 16 мкм;
- радіальне биття не мало перевищувати 20 мкм.

Для здійснення контролю геометричних розмірів використовували електронний штангенциркуль типу ІР-40 з точністю до 0,01 мм та індикатор часового типу з точністю до 0,01 мм.

Аналіз зношених деталей на поліграфічних підприємствах показав, що деталі поліграфічного устаткування виготовлено переважно з таких матеріалів:

- сталь сортована прокатна конструкційна вуглецева – 57 %;
- чорний чавун – 34,2 %;
- сталь сортована прокатна конструкційна легована – 2,6 %;
- сталь інструментальна – 2,6%;
- бабіти – 1 %;
- бронза – 1,7 %;
- латунь – 0,7 %;
- червона мідь – 0,2 %.

Відсоткове відношення матеріалів, з яких виготовляють деталі поліграфічного устаткування, показано на рис. 1.10.

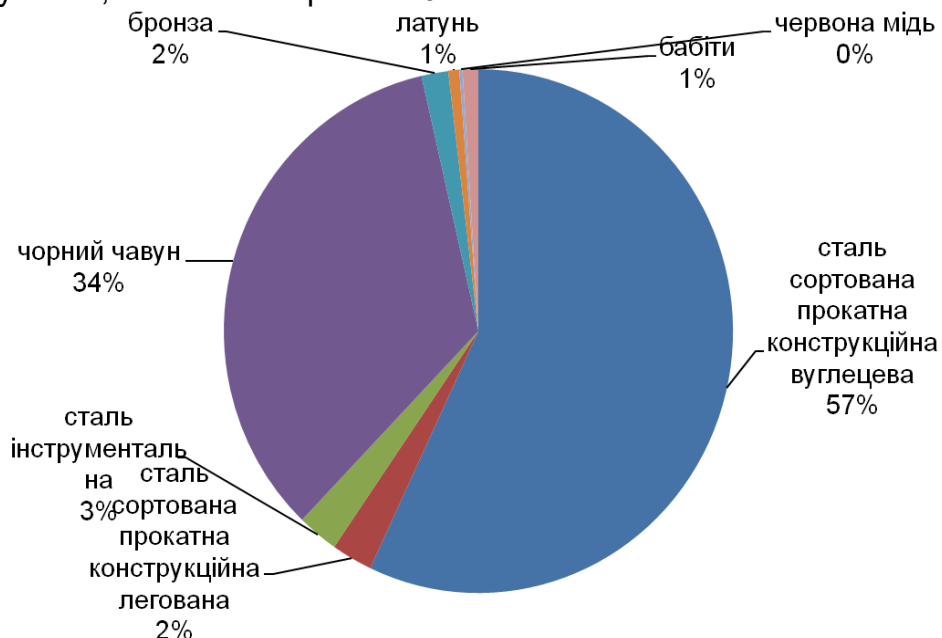


Рис. 1.10. Відсоткове відношення матеріалу зношених деталей на поліграфічних підприємствах

Хімічний склад матеріалів, з яких виготовлено деталі типу «тіл обертання», застосовувані у поліграфічному устаткуванні, наведено у табл. 1.2 [53].

Таблиця 2.2

Матеріали зношених деталей із зазначенням хімічного складу

№ з/п	Матеріал	Вміст легувальних елементів, %
1	Сталь 20	Сталь конструкційна вуглецева якісна із вмістом: 0,17...0,24 % C, 0,17...0,37 % Si, 0,35...0,65 % Mn, до 0,25 % Cr, до 0,04 % S, до 0,035 % P, до 0,3 % Ni, до 0,3 % Cu, до 0,08 % As (ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні вимоги) [54].
2	Сталь 40	Сталь конструкційна вуглецева якісна із вмістом: 0,37...0,45 % C, 0,17...0,37 % Si, 0,5...0,8 % Mn, до 0,3 % Ni, до 0,25 % Cr, до 0,04 % S, до 0,035 % P, до 0,3 % Cu, до 0,08 % As (ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні вимоги) [54].
3	Сталь 45	Сталь конструкційна вуглецева якісна із вмістом: 0,42...0,5 % C, 0,17...0,37 % Si, 0,5...0,8 % Mn, до 0,3 % Ni, до 0,25 % Cr, до 0,04 % S, до 0,035 % P, до 0,3 % Cu, до 0,08 % As (ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні вимоги) [54].
4	У 10	Сталь інструментальна вуглецева із вмістом: 0,95...1,09 % C, 0,17...0,33 % Si, до 0,25 % Cu, 0,17...0,33 % Mn, до 0,25 % Ni, до 0,030 % P, до 0,2 % Cr, до 0,028 % S (ДСТУ 3833-98. Прутки, штаби та мотки з інструментальної нелегованої сталі. Загальні технічні умови) [55].
5	Сталь 20Х	Сталь конструкційна легована (хромиста) із вмістом: 0,17...0,23 % C, 0,17...0,37 % Si, 0,5...0,8 % Mn, до 0,3 % Ni, до 0,03 5% S, до 0,035 % P, 0,7...1 % Cr, до 0,25 % Cu (ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови) [56].
6	ХГС	Сталь інструментальна легована (хромокремнієвомарганцева) із вмістом: 0,95...1,05 % C, 0,4...0,7 % Si, 0,85...1,25 % Mn, до 0,4 % Ni, до 0,03 % S, до 0,03 % P, 1,3...1,65 % Cr, до 0,2 % Mo, до 0,2 % W, до 0,15 % V, до 0,03 % Ti, до 0,3 % Cu (ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови) [56].
7	18ХГТ	Сталь конструкційна легована (хромомарганцева) із вмістом: 0,17...0,23 % C, 0,17...0,37 % Si, 0,8...1,1 % Mn, до 0,3 % Ni, до 0,035 % S, до 0,035 % P, 1...1,3 % Cr, 0,03...0,09 % Ti, до 0,3 % Cu (ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови) [56].
8	38ХМЮА	Сталь жароміцна релаксаційностійка (хромоалюмінієва з молібденом) із вмістом: 0,35...0,42 % C, 0,2...0,45 % Si, 0,3...0,6 % Mn, до 0,3 % Ni, до 0,025 % S, до 0,025 % P, 1,35...1,65 % Cr, 0,15...0,25 % Mo, 0,7...1,1 % Al, до 0,3 % Cu (ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови) [56].

Металеві зразки для експериментальних і теоретичних досліджень виготовлені відповідно до стандартних вимог до матеріалів. Усі зразки, було виконано з одного матеріалу, вони мали однакові фізико-механічні властивості та хімічний склад.

Технологічний процес до виконання вібраційного накатування полягав у здійсненні чорнової, напівчистої та чистої обробки зразків, яку виконували залежно від точності точінням на токарно-гвинторізних універсальних верстатах і шліфуванням на круглошліфувальних верстатах. Під час обробки застосовували пристрої для закріплення заготовок, контрольно-вимірювальні прилади і відповідні умови обробки. Для кожного типу експериментальних досліджень використовували окремі зразки, наприклад для визначення стереометрії поверхні (шорсткість, зносостійкість) брали валикоподібні зразки. Для досліджень, приміром, металографічних, фізико-механічних властивостей потрібно, щоб зразки були виконані відповідної форми.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПІДґРУНТЯ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ КОМПЛЕКСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1. Взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу та якістю виготовлення поліграфічної продукції

Дослідження, які проводились для визначення параметрів поверхні циліндричних деталей, не були спрямовані на визначення залежностей між процесом обробки поверхні друкарського циліндра та якістю відбитка, що пов'язано зі значною кількістю чинників.

Детальний аналіз складових елементів чинників, які мають дію на якісні характеристики відбитка, показав, що актуальним є питання вивчення взаємозв'язку між технологічним процесом обробки поверхні циліндричних деталей та параметрами поліграфічної продукції.

Загальновідоме визначення якості як системи дозволяє використовувати вагомі показники властивостей як матеріалів для виготовлення циліндричних деталей, так і властивості витратних матеріалів у процесі друкування для комплексного оцінювання під час визначення параметрів якості відбитка [57]. Це, у свою чергу, схиляє до врахування не лише окремих показників у процесі формулювання комплексної оцінки якісних параметрів відбитка, але й їхнього взаємозв'язку.

Оцінювання якості поліграфічної продукції прямо залежить від її призначення [22, 58, 59, 60]. На цьому принципі формуються показники якості в нормативній документації і надаються певні рекомендації для виготовлення поліграфічної продукції. Рівень якості конкретного виду друкованої продукції залежить від повноти врахованих характеристик та від їх аналізу [22].

Взаємозв'язок між параметрами поверхневого шару друкарського циліндра → експлуатаційними властивостями обладнання → якістю друкарського відбитка за рахунок керування технологічним процесом обробки поверхні друкарського циліндра, де останньою, фінішною ланкою технологічного процесу є вібраційне накатування для отримання повністю регулярного МР, представленою параметричною системою технологічного процесу двобічного друкування [60].

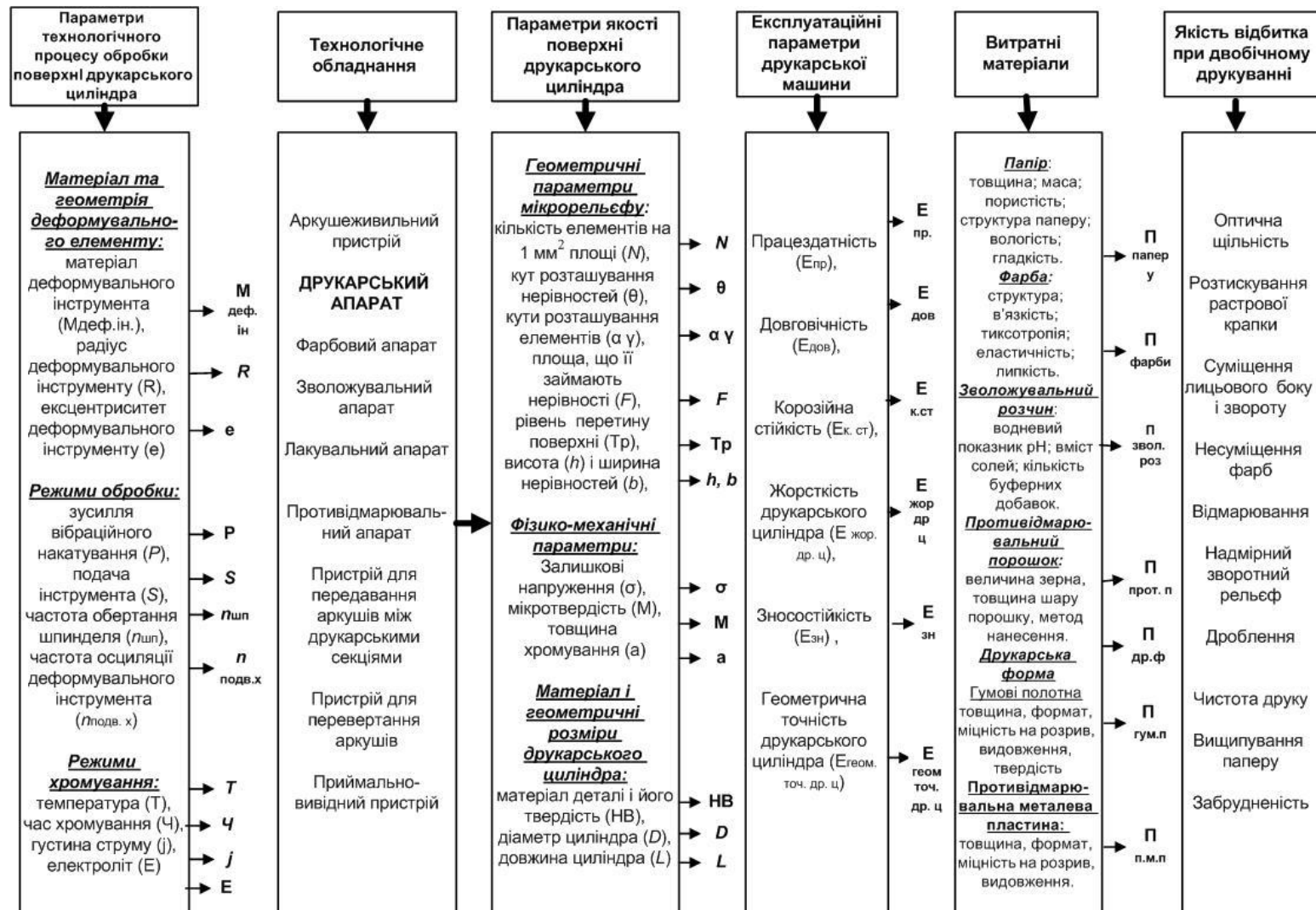


Рис. 2.1. Взаємозв'язок між методом вібраційного накатування та якістю відбитка на основі параметричної системи

Відповідно до рис. 2.1 параметрична система поєднує як технологічний процес обробки поверхні циліндричних деталей, так і технологічний процес роботи обладнання.

Технологічні параметри методу вібраційного накатування містять:

- матеріал та геометрію деформівного елемента, радіус деформівного інструмента, ексцентриситет деформівного інструмента;

- режими обробки вібраційним накатуванням – зусилля вдавлювання, подачу інструмента, частоту обертання заготовки та частоту осциляцій інструмента;

- режими хромування: температуру, густину струму, час витримки, електроліт.

Поверхневий шар деталей окреслюється:

- геометричними характеристиками МР: кількістю елементів на 1 мм² площі, кутом направлення розташування нерівностей, кутом направлення розташування елементів, відносною площею, що її займають нерівності, рівнем перетину поверхні, висотою і шириною нерівностей;

- фізико-механічними властивостями: залишковими напруженнями, мікротвердістю, товщиною хромування;

- властивостями матеріалу друкарського циліндра та його геометричними розмірами: діаметром і довжиною друкарського циліндра, його твердістю.

Якість готової поліграфічної продукції характеризується системою комплексних показників, що формуються у друкарській системі та мають забезпечувати чітке відтворення кольорового відбитка. Відхилення умов будь-якого елемента системи призводить до погіршення якості.

Під час реалізації технологічного процесу дотримання показників якості є складним завданням, оскільки вони залежать як від властивостей основних матеріалів (паперу, фарби, зволожувального розчину, друкарської форми, протівідмарювальної пластини тощо) та від технічних режимів роботи поліграфічних машин, так і від експлуатаційних характеристик обладнання.

Встановлюючи взаємозв'язок, варто розглянути вплив параметрів вхідних матеріалів, від яких прямо залежить стабільний перебіг технологічного процесу й виникнення дефектів [61].

Для паперу це структурні показники, молекулярно-фізичні, оптичні, механічні та інші властивості, вони визначаються, переважно, видом поліграфічної продукції [62]; для фарби – друкарсько-технічні й оптичні властивості, а також стійкість шару фарби на відбитках [63]. Відповідність цих показників регламентується стандартами і технічними умовами, оскільки на основі цих даних обирають технічні режими

процесів і забезпечують якість відбитка. Для зволожувального розчину важливі водневий показник, твердість води, вміст солей тощо. Зволожувальний розчин змочує поверхню пробільних елементів і забезпечує їхню гідрофільність, не чинити шкідливого впливу на папір і корозійного впливу на металеві деталі друкарської машини [64]. Для гумовотканинного полотна слід враховувати структурно-механічні властивості, які визначають тиск і характер розподілу навантаження у смузі друкарського контакту, що, у свою чергу, забезпечує стабільність технології. Якість гумових полотен характеризують показники товщини, формату, міцності на розрив, видовження, твердості, компресійності, антиадгезійні властивості тощо [60]. Для друкарської форми показниками, які впливають на стабільність друкарського процесу, є товщина, формат, тиражостійкість тощо [65]. Для протидмарювальної металевої пластини враховують товщину, формат, стійкість протидмарювального шару до стирання, міцність на розрив тощо.

Варто зазначити, що експлуатаційні властивості обладнання (працездатність, довговічність, корозійна стійкість, зносостійкість тощо) залежать від багатьох факторів. Працездатність роботи деталей обладнання залежить від здатності протистояти інтенсивним навантаженням і шкідливому впливу навколишнього середовища, спричинених наявністю корозійних, кавітаційно-ерозійних та теплових явищ. Тому найбільша втрата працездатності машин у процесі їх експлуатації найчастіше пов'язана з руйнуванням поверхні [66, 67].

Пріоритетне визначення впливу названих показників на якість готового видання є завданням, яке має систематизувати та об'єднати взаємодію на всіх етапах проектування, виготовлення деталей та реалізації ними своїх функціональних властивостей.

2.2. Вплив режимів обробки комплексних технологічних процесів на геометричні параметри мікрорельєфу

Багато видів обробки деталей, такі як точіння, різання, шліфування, утворюють МР, неоднорідний за формою і розмірами. Такий характер МР викликає труднощі у вирішенні певних завдань: технологічного забезпечення, нормування, вимірювання і контролю. У результаті практично неможливі нормування параметрів мікрогеометрії на основі аналітичних розрахунків, а також виявлення залежності між різними геометричними параметрами якості поверхні та їх експлуатаційними властивостями [7, 68].

Експлуатаційні властивості деталей машин безпосередньо залежать від стану поверхневих шарів. Щоб ці властивості покращити, потрібно знайти оптимальну систему параметрів якості поверхні деталей.

Мікрорельєф, утворений вібронакатуванням, має закономірно розміщені одна відносно одної нерівності однакових форми й розміру за рахунок складної кінематики руху деформівного інструмента. Ускладнена кінематика процесу вібронакатування в поєднанні з технологічними режимами дає змогу керувати формою й розміщенням елементів МР, а отже можливість керувати параметрами якості поверхневого шару. У багатьох випадках оптимізація МР поєднується зі зміцненням поверхневого шару, що, у свою чергу, підвищує експлуатаційні властивості деталей [69].

У роботі обладнання найбільш інформативним параметром є відносна опорна площа, яку визначають регулярні нерівності, особливо коли деталі та механізми працюють в умовах тертя й на завершальному етапі їх виготовлення застосовують ОЗО.

У наукових працях П. О. Киричка, Е. В. Рижова, Ю. Г. Шнейдера та інших авторів проведено глибокий аналіз залежності між параметрами РМР і технологічними режимами методу вібраційного накатування [35, 70, 71, 72, 73, 74], що підтверджує важливість дослідження такої взаємодії для запропонованого комплексного технологічного процесу.

Для розрахунку геометричних характеристик циліндричних поверхонь необхідно виходити з відповідної математичної моделі процесу утворення МР. Зі збільшенням кількості факторів, які визначають параметри МР, точність розрахунків підвищується, але при цьому ускладнюються самі розрахунки [75, 76, 77, 78, 79].

Частково регулярний мікрорельєф (ЧРМР) поділяють на дискретно й безперервно регулярні нерівності. Розглянемо ЧРМР з безперервно регулярними нерівностями, в яких немає перетину нерівностей з елементами увігнутої форми. Щоб отримати раціональні залежності між відносною площею, що її займають регулярні нерівності (F_H) першого типу, і технологічними факторами, зроблено такі припущення:

– заготовка, що піддається обробці, є ідеально круглою циліндричною;

– $v_1 \ll v$ та $v_1 \ll 2\pi n_{\text{подв.х}} A$, де v_1 – поступальна швидкість руху деформівного елемента;

– МР поверхні не має відхилень;

– діють усі припущення теорії пружності та фізики твердого тіла;

– глибина вдавлювання є однаковою в усіх перерізах циліндричної заготовки.

Після вдавлювання деформівного елемента в циліндричну поверхню утворюється відбиток, межі якого на поверхні розгортки мають вигляд кривої центру відбитка L та кривих K_+ (верхня межа канавки), K_- (нижня межа канавки), які близькі до кола радіусом ρ , 2ρ є товщиною відбитка (рис. 2.2) [74].

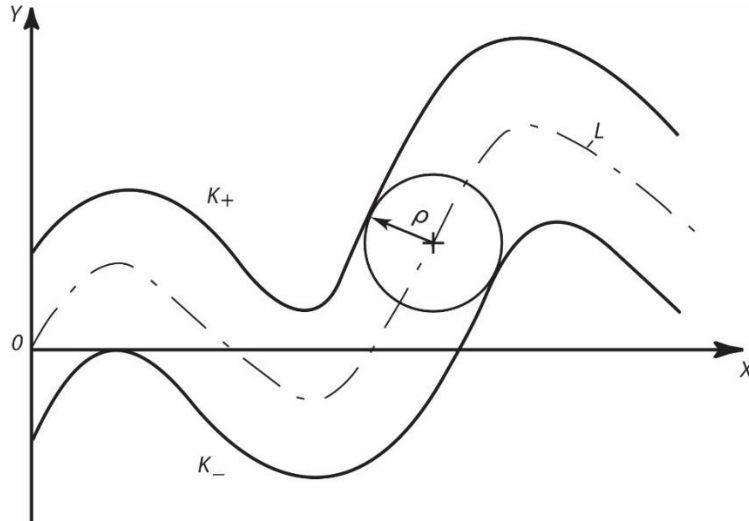


Рис. 2.2. Канавка на поверхні циліндричної деталі

Відносна опорна площа поверхні F_H – це відношення площі, що її займають регулярні нерівності (S) до поверхні оброблюваної деталі ($S_{\text{заг}}$),

$$F_H = \frac{S}{S_{\text{заг}}} 100\%. \quad (2.1)$$

Траєкторію деформівного елемента L описують залежністю

$$L \begin{cases} x = \vartheta t \\ y = v_1 t + l \sin(2\pi n_{\text{подв.х}} t) \end{cases} \quad (2.2)$$

де ϑ – швидкість заготовки, мм/с,

$$\vartheta = \pi n_{\text{шп}} d_3. \quad (2.3)$$

Із залежності (2.2) випливає, що

$$t = \frac{x}{v}. \quad (2.4)$$

Підставимо (2.4) у (2.2), знайдемо L :

$$y = \frac{v_1}{v} x + A \sin\left(\frac{2\pi n_{\text{подв.х}}}{v} x\right) = L(x). \quad (2.5)$$

Знайдемо рівняння K_+ та K_- . Розглянемо точку $(x_0, L(x_0))$ на кривій L .

Беремо: $l_0(x)$ – нормаль до L в точці $(x_0, L(x_0))$. Запишемо відоме рівняння нормалі:

$$l_0(x) = -\frac{1}{L'(x_0)}(x - x_0) + L(x_0). \quad (2.6)$$

Знайдемо похідну залежності (2.5):

$$L'(x) = \frac{v_1}{v} + \frac{2\pi n_{\text{подв.х}} A}{v} \cos \frac{2\pi n_{\text{подв.х}}}{v} x. \quad (2.7)$$

Підставимо (2.7) та (2.5) у (2.6):

$$l_0(x) = -\frac{v}{v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х}} A \cos \frac{2\pi n_{\text{подв.х}}}{v} x_0} (x - x_0) + \frac{v_1}{v} x_0 + A \sin \left(\frac{2\pi n_{\text{подв.х}}}{v} x_0 \right). \quad (2.8)$$

Точки $(x_+, K_+(x_+))$ та $(x_-, K_-(x_-))$ є точками на K_+ та K_- й від них до $(x_0, L(x_0))$ дорівнює ρ :

$$\rho^2 = (x_0 - x)^2 + (L(x_0) - l_0(x))^2. \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) записано для знаходження x_+ та x_- (бо $(x_+, K_+(x_+))$ та $(x_-, K_-(x_-))$ лежать на нормалі l_0). Підставимо (2.6) у (2.9):

$$\rho^2 = (x_0 - x)^2 \left(1 + \frac{1}{L'(x_0)^2} \right). \quad (2.10)$$

Звідси

$$x_{\pm} = x_0 \mp \frac{\rho L'(x_0)}{\sqrt{1 + L'(x_0)^2}}. \quad (2.11)$$

Тоді

$$K_{\pm}(x_{\pm}) = L(x_0) \pm \frac{\rho}{\sqrt{1 + L'(x_0)^2}}. \quad (2.12)$$

Підставивши

$$x_0 = vt, \quad (2.13)$$

отримаємо рівняння кривих $K_{\pm}$:

$$K_{\pm} \begin{cases} x(t) = vt \mp \frac{\rho L'(x_0)}{\sqrt{1 + L'(x_0)^2}}; \\ y(t) = L(vt) \pm \frac{\rho}{\sqrt{1 + L'(x_0)^2}}. \end{cases} \quad (2.14)$$

Підставимо у (2.14), відповідно, (2.7) та (2.5):

$$K_{\pm} \begin{cases} x(t) = vt \mp \frac{\rho(v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х}} A \cos 2\pi n_{\text{подв.х}} t)}{\sqrt{v^2 + (v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х}} A \cos 2\pi n_{\text{подв.х}} t)^2}}; \\ y(t) = v_1 t + A \sin 2\pi n_{\text{подв.х}} t \pm \frac{\rho v}{\sqrt{v^2 + (v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х}} A \cos 2\pi n_{\text{подв.х}} t)^2}}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Тоді площу S відбитка можна обчислити за такою залежністю:

$$S = \frac{l}{v_1} n_{\text{подв.х}} I, \quad (2.16)$$

де $\frac{l}{v_1}$ – час роботи,

I – площа відбитка за один прохід осциляції:

$$I = \int_0^{n_{\text{подв.х}}} K_+(t) \cdot x'_+(t) dt - \int_0^{n_{\text{подв.х}}} K_-(t) \cdot x'_-(t) dt. \quad (2.17)$$

Візьмемо (2.7) і позначимо як

$$L'(vt) = \Psi(t) = \frac{1}{v} (v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х}} A \cos 2\pi n_{\text{подв.х}} t). \quad (2.18)$$

Підставимо (2.18) у (2.15), тоді

$$K_{\pm} \begin{cases} x_{\pm}(t) = vt \mp \frac{\rho\Psi(t)}{\sqrt{1+\Psi^2(t)}}; \\ y(t) = v_1 t + A \sin 2\pi n_{\text{подв.х.}} t \pm \frac{\rho}{\sqrt{1+\Psi^2(t)}}. \end{cases} \quad (2.19)$$

Візьмемо похідну із (2.19), щоб підставити у (2.17):

$$x'_{\pm}(t) = v \pm \frac{\rho\Psi'(t)}{2(1+\Psi^2(t))^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.20)$$

Підставимо (2.20) та (2.19) у (2.17):

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\frac{1}{n_{\text{подв.х.}}}} \left(v_1 t + A \sin 2\pi n_{\text{подв.х.}} t + \frac{\rho}{\sqrt{1+\Psi^2(t)}} \right) \left(v + \frac{\rho\Psi'(t)}{2(1+\Psi^2(t))^{\frac{3}{2}}} \right) dt - \\ &- \int_0^{\frac{1}{n_{\text{подв.х.}}}} \left(v_1 t + A \sin 2\pi n_{\text{подв.х.}} t - \frac{\rho}{\sqrt{1+\Psi^2(t)}} \right) \left(v - \frac{\rho\Psi'(t)}{2(1+\Psi^2(t))^{\frac{3}{2}}} \right) dt = \\ &= \rho \int_0^{\frac{1}{n_{\text{подв.х.}}}} \left(\frac{2v}{\sqrt{1+\Psi^2(t)}} + \frac{(v_1 t + A \sin 2\pi n_{\text{подв.х.}} t)\Psi'(t)}{(1+\Psi^2(t))^{\frac{3}{2}}} \right) dt = \rho \cdot c, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де c – константа.

Як відомо, довжина траєкторії L становить

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{S}{2\rho} = C. \quad (2.22)$$

У цьому випадку підставимо (2.16) у (2.22):

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{S}{2\rho} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\Lambda}{v_1} n_{\text{подв.х.}} \frac{I}{2\rho}. \quad (2.23)$$

Підставивши кінцевий результат (2.21) у (2.23), отримаємо:

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\Lambda}{v_1} n_{\text{подв.х.}} \frac{I}{2\rho} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{l}{v_1} n_{\text{подв.х.}} \frac{c}{2} = \frac{l}{v_1} n_{\text{подв.х.}} \frac{c}{2} = C, \quad (2.24)$$

де $\frac{c}{2}$ – довжина траєкторії L на одному періоді осциляцій:

$$c = 2v \int_0^{\frac{1}{n_{\text{подв.х.}}}} \sqrt{1+\Psi^2(t)} dt. \quad (2.25)$$

Підставимо (2.18) у (2.25):

$$c = 2 \int_0^{\frac{1}{n_{\text{подв.х.}}}} \sqrt{v^2 + (v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х.}} A \cos 2\pi n_{\text{подв.х.}} t)^2} dt, \quad (2.26)$$

$$c = \frac{1}{\pi n_{\text{подв.х.}}} \int_0^{2\pi} \sqrt{v^2 + (v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х.}} A \cos z)^2} dz, \quad (2.27)$$

Підставимо (2.27) та (2.21) у (2.16):

$$S = \frac{l\rho}{\pi v_1} \int_0^{2\pi} \sqrt{v^2 + (v_1 + 2\pi n_{\text{подв.х.}} A \cos z)^2} dz. \quad (2.28)$$

Підставимо (2.3) у (2.28):

$$S = \frac{2l\rho n_{\text{шп}}}{v_1} \int_0^\pi \sqrt{d_3^2 + \left(\frac{v_1}{\pi n_{\text{шп}}} + 2 \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}} A \cos z \right)^2} dz. \quad (2.29)$$

Записаний тут інтеграл є еліптичним.

Якщо додатково відомо, що $v_1 \ll v$ та $v_1 \ll 2\pi n_{\text{подв.х.}} l$, то аналітична залежність (2.28) матиме вигляд

$$\begin{aligned} S &\approx \frac{l\rho}{\pi v_1} \int_0^{2\pi} \sqrt{v^2 + (2\pi n_{\text{подв.х.}} A)^2 \cos^2 z} dz = \\ &= \frac{4l\rho}{\pi v_1} \sqrt{v^2 + (2\pi n_{\text{подв.х.}} A)^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi n_{\text{подв.х.}} A}{\sqrt{v^2 + (2\pi n_{\text{подв.х.}} A)^2}} \right)^2} \sin^2 z dz = \\ &= \frac{4l\rho}{\pi v_1} \sqrt{v^2 + (2\pi n_{\text{подв.х.}} A)^2} E \left(\frac{2\pi n_{\text{подв.х.}} A}{\sqrt{v^2 + (2\pi n_{\text{подв.х.}} A)^2}} \right), \end{aligned} \quad (2.30)$$

де $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 z} dz = E(k)$ – повний нормальний еліптичний інтеграл Лежандра 2-го роду, який записують так:

$$\begin{aligned} E(k) &= \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{(2n)!}{2^{2n} \cdot (n!)^2} \right)^2 \frac{k^{2n}}{1 - 2n} = \\ &= \frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{k^2}{1} - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \frac{k^4}{3} - \dots - \left(\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 \frac{k^{2n}}{2n-1} - \dots \right]. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Підставимо (3.7) у (2.3):

$$S \approx \frac{4l\rho n_{\text{шп}}}{v_1} \sqrt{d_3^2 + \left(2\rho \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}} \right)^2} E \left(\frac{2A \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}}}{\sqrt{d_3^2 + \left(2A \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}} \right)^2}} \right). \quad (2.32)$$

Загальна площа деталі

$$S = \pi d_3 l, \quad (2.33)$$

тому відносну площу відбитка з урахуванням (2.29) обчислимо так:

$$\begin{aligned} F_H &= \frac{S}{\pi d_3 l} 100 \% = \\ &= \frac{2\rho n_{\text{шп}}}{\pi d_3 v_1} \int_0^\pi \sqrt{d_3^2 + \left(\frac{v_1}{\pi n_{\text{шп}}} + 2 \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}} A \cos z \right)^2} dz \cdot 100 \%. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Якщо врахувати, що $v_1 \ll v$ та $v_1 \ll 2\pi n_{\text{подв.х.}} A$, тоді аналітична залежність (2.34) матиме вигляд

$$F_H = \frac{4\rho n_{\text{шп}}}{\pi d_3 v_1} \sqrt{d_3^2 + \left(2A \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}} \right)^2} E \left(\frac{2A \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}}}{\sqrt{d_3^2 + \left(2A \frac{n_{\text{подв.х.}}}{n_{\text{шп}}} \right)^2}} \right) 100 \%. \quad (2.35)$$

Зауважимо, що ці залежності справедливі лише тоді, коли ЧРМР не перетинається, тобто

$$2A \ll v_1 \frac{\pi d_3}{v} = \frac{v_1}{n_{\text{шп}}}. \quad (2.36)$$

$$\text{Час повного обертання } \frac{1}{n_{\text{шп}}} = \frac{\pi d_3}{v}.$$

Крім того, в обчисленнях вважали, що K_+ та K_- описують деякі функції, а це справедливо лише для випадку, коли ρ не перевищує мінімального радіуса кривизни траєкторії L . Знайдемо другу похідну від залежності (2.5):

$$y'' = -A \frac{(2\pi n_{\text{подв.х}})^2}{v^2} \sin \frac{2\pi n_{\text{подв.х}}}{v} x, \quad (2.37)$$

$$\min_x \left| \frac{1}{y''} \right| = \frac{v^2}{A(2\pi n_{\text{подв.х}})^2} \geq \rho. \quad (2.38)$$

Якщо підставити (2.3) у (2.38), отримаємо:

$$\rho \leq \left(\frac{n_{\text{шп}}}{n_{\text{подв.х}}} \right)^2 \frac{d_3^2}{2A}. \quad (2.39)$$

Тож у разі виконання умов (2.36) та (2.39) відносну площу знаходять за аналітичною залежністю (2.34).

Якщо додатково виконуються умови $v_1 \ll \pi d_3 n_{\text{шп}}$ та $v_1 \ll 2\pi n_{\text{подв.х}} A$, то

$$\begin{aligned} F_H &\approx \frac{4\rho n_{\text{шп}}}{\pi v_1} \sqrt{1 + \left(2 \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}} \frac{A}{d_3} \right)^2} E \left(\frac{2A \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}}}{\sqrt{d_3^2 + \left(2A \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}} \right)^2}} \right) 100 \% = \\ &= \frac{4\rho n_{\text{шп}}}{\pi v_1} \sqrt{1 + \left(2i \frac{A}{d_3} \right)^2} E \left(\frac{2Ai}{\sqrt{d_3^2 + (2Ai)^2}} \right) 100 \%, \end{aligned} \quad (2.40)$$

де $\rho = \sqrt{R \cdot h}$ – радіус товщини відбитка, мм;

$E(k) = \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{(2n)!}{2^{2n} \cdot (n!)^2} \right)^2 \frac{k^{2n}}{1-2n}$ – повний нормальний еліптичний інтеграл Лежандра 2-го роду [80].

Після вібраційного накатування наступною операцією є хромування, тож визначимо відносну опорну площу поверхні після цієї операції:

$$F_{H1} = \sqrt{1 + \left(2 \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}} \frac{A}{d_3} \right)^2 - 2h_1 \frac{\left(2 \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}} \frac{A}{d_3} \right)^2 \frac{1}{d_3}}{\sqrt{1 + \left(2 \frac{n_{\text{подв.х}}}{n_{\text{шп}}} \frac{A}{d_3} \right)^2}} =$$

$$= \sqrt{1 + \left(2i \frac{A}{d_3}\right)^2 - 2h_1 \frac{\left(2i \frac{A}{d_3}\right)^2 \frac{1}{d_3}}{\sqrt{1 + \left(2i \frac{A}{d_3}\right)^2}}} 100\%. \quad (2.41)$$

Встановлені аналітичні залежності між відносною площею, яку займають регулярні нерівності синусоїдального типу, та технологічними режимами процесу вібраційного накатування. Утворювана на циліндричних поверхнях деталей необхідна величина відносної площі дозволяє підвищувати їх зносостійкість за певних умов експлуатації, а також забезпечувати відповідну маслостійкість [69].

Процес утворення МР у вигляді лунок чи канавок сприяє підвищенню маслоутримної здатності й опору задирам хромового покриття.

На зносостійкість і припрацювання хрому впливають параметри маслоутримного МР поверхні. В умовах граничного тертя зі збільшенням канавок до 15...20 % зношування хромованого покриття, осадженого за температури 58...66 %, зменшується. У разі збільшення канавок на понад 30...35 % зношування хрому різко зростає. Такий характер залежності вказує на те, що збільшення відносної площі до відповідної величини покращує маслоутримну здатність без зменшення міцності покриття.

Враховуючи необхідне припрацювання хромованих деталей, можна рекомендувати комплексну технологію з відносною площею 25...35 % і мікротвердістю 8500...11500 МПа, що дозволяє отримати досить високу зносостійкість.

Повністю регулярний мікрорельєф (ПРМР) утворюється за рахунок кінематики процесу вібронакатування та різних параметрів режиму[76]. У нашому випадку мікрорельєф має такі параметри:

- клас – з елементами ввігнутої форми;
- група – новий мікрорельєф;
- вид – сітчастий;
- тип – шестикутний.

Під час утворення ПРМР деформівний елемент утворює площу вдавлювання (рис. 2.3), яка залежить від діаметра d і глибини вдавлювання h :

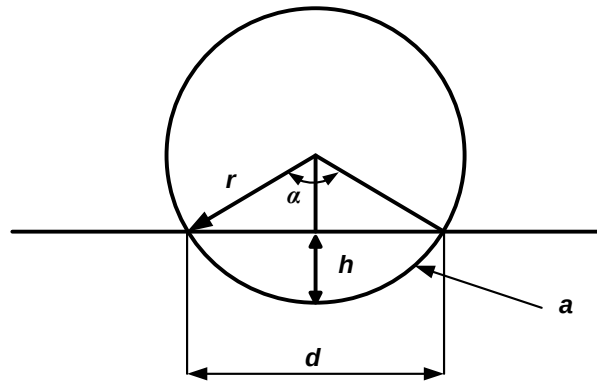


Рис. 2.3. Утворення площі вдавлювання на поверхні циліндричної деталі

$$\begin{cases} d = 2r \sin \frac{\alpha}{2} \\ h = r \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \end{cases} \Rightarrow \alpha = 2 \arcsin \frac{d}{2r} = 2 \arccos \frac{r-h}{r}. \quad (2.42)$$

Довжину дуги вдавлювання a знаходять з формули

$$a = \alpha r. \quad (2.43)$$

Обчислимо площу вдавлювання на період осциляції, яку позначимо μ .

Відомо, що для плоского випадку задачі площа має вигляд

$$S(d) = L \cdot d, \quad (2.44)$$

де L – довжина траєкторії центру вдавлювання;

d – ширина канавки.

Звідси очевидно, що для нашого випадку площу поверхні на відстані від d до $d + \Delta$ від траєкторії центру розраховують за формулою (2.45):

$$\Delta S = 2(S(d + \Delta) - S(d)). \quad (2.45)$$

Тоді площа вдавлювання становитиме:

$$\mu = \int_0^{\frac{\alpha}{2}} dS_{\beta}, \quad (2.46)$$

де dS_{β} – площа вдавлювання в куті між β та $\beta + d\beta$ (рис. 2.4).

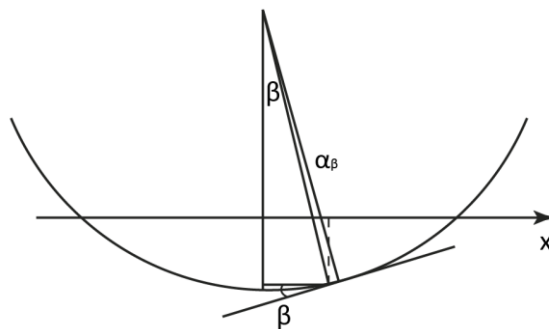


Рис. 2.4. Площа вдавлювання в куті між β та $\beta + d\beta$

Ураховуючи, що:

$$x(\beta) = r \sin \beta \quad (2.47)$$

$$dx = r \cos \beta d\beta \quad (2.48)$$

площа вдавлювання в куті між β та $\beta + d\beta$ становитиме

$$dS_\beta = 2 \frac{S(x+dx) - S(x)}{\cos \beta} = 2 \frac{L \cdot r \cos \beta d\beta}{\cos \beta} = 2Lr d\beta. \quad (2.49)$$

Підставивши значення у формулу (2.46), дістанемо:

$$\mu = \int_0^{\alpha/2} 2Lr d\beta = 2Lr \frac{\alpha}{2} = L \cdot \alpha r = L \cdot a. \quad (2.50)$$

Далі вважатимемо, що d – сторона шестикутника, α – кут, під яким перетинаються центри двох траєкторій.

$$y^2 + (z - r)^2 = r^2, \quad (2.51)$$

де r^2 – циліндр на висоті r вздовж вісі Ox .

$$z = r - \sqrt{r^2 - y^2}, \quad (2.52)$$

$$\Phi: \begin{cases} x = x; \\ y = y; \\ z = r - \sqrt{r^2 - y^2}; \end{cases}, \quad (2.53)$$

$$\frac{dz}{dx} = 0; \quad \frac{dz}{dy} = \frac{y}{\sqrt{r^2 - y^2}}, \quad (2.54)$$

$$S_1 = \iint_D \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} dx dy = \iint_D \frac{r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dx dy, \quad (2.55)$$

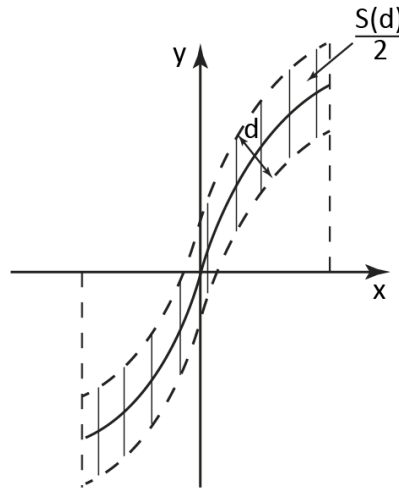


Рис. 2.5. Схема формування мікрорельєфу

де D – множина, обмежена прямими L_1, L_2, L_3 ,

$$L_1: y = x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (2.56)$$

$$L_2: y = -x \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (2.57)$$

$$L_3: y = \left(x - \frac{d}{2}\right) \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.58)$$

$$x_1 = L_1 \cap L_3: \text{Ох} \quad x_1 \operatorname{tg} \alpha - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha = x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \Rightarrow x_1 = \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha}, \quad (2.59)$$

$$x_2 = L_2 \cap L_3 | : O x \quad x_2 \operatorname{tg} \alpha - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha = -x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \Rightarrow x_2 = \frac{d}{2} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha}, \quad (2.60)$$

a

$$\int \arcsin \frac{x-c}{b} dx = b \left(\left(\frac{x-c}{b} \right) \arcsin \frac{x-c}{b} + \sqrt{1 - \left(\frac{x-c}{b} \right)^2} \right)$$

можна використати для довідки,

$$\begin{aligned} S_1 &= \iint_D \frac{r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dx dy = \\ &= \int_0^{x_2} \int_{-x \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}^{x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dx dy + \int_{x_2}^{x_1} \int_{x \operatorname{tg} \alpha - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha}^{x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dx dy = \\ &= \int_0^{x_2} \left(r \arcsin \frac{y}{r} \Big|_{-x \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}^{x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right) dx + \int_{x_2}^{x_1} \left(r \arcsin \frac{y}{r} \Big|_{(x - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}^{x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right) dx = \\ &= \int_0^{x_1} \left(r \arcsin \frac{x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right) dx + \int_0^{x_2} \left(r \arcsin \frac{x \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right) dx - \\ &\quad - \int_{x_2}^{x_1} \left(r \arcsin \frac{(x - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} \right) dx = \\ &= r^2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \left(\frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} \arcsin \frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} + \sqrt{1 - \left(\frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right)^2} - 1 \right) + \\ &\quad + r^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} \arcsin \frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} + \sqrt{1 - \left(\frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right)^2} - 1 \right) - \end{aligned}$$

$$-r^2 \operatorname{ctg} \alpha \left(\frac{(x_1 - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} \arcsin \frac{(x_1 - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} - \frac{(x_2 - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} \arcsin \frac{(x_2 - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} + \sqrt{1 - \left(\frac{(x_1 - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} \right)^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{1 - \left(\frac{(x_2 - \frac{d}{2}) \operatorname{tg} \alpha}{r} \right)^2} \right), \quad (2.61)$$

$$\left(x_1 - \frac{d}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha} = x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (2.62)$$

$$\left(x_2 - \frac{d}{2} \right) \operatorname{tg} \alpha = -\frac{d}{2} \cdot \frac{\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha} = -x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}, \quad (2.63)$$

$$S_1 = r^2 \left(\frac{x_1}{r} \arcsin \frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} + \frac{x_2}{r} \arcsin \frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} - \frac{x_1}{r} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha - \arcsin \frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right) - \\ - r^2 \cdot \frac{x_2}{r} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha - \arcsin \frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} - r^2 \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right) + \\ + r^2 \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha \right) \sqrt{1 - \left(\frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right)^2} + r^2 \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha \right) \sqrt{1 - \left(\frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right)^2} = \\ = r^2 \cdot \frac{x_1}{r} \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha \right) \arcsin \frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} + r^2 \cdot \frac{x_2}{r} \left(1 - \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \alpha \right) \arcsin \frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} - \\ - \frac{2r^2}{\sin \alpha} + r^2 \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha \right) \sqrt{1 - \left(\frac{x_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right)^2} + \\ + r^2 \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{x_2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{r} \right)^2} = \\ = r^2 \cdot \frac{d}{2r} \arcsin \left(\frac{d}{2r} \cdot \frac{1}{\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha} \right) + \\ + r^2 \cdot \frac{d}{2r} \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha} \arcsin \left(\frac{d}{2r} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha} \right) - \\ - \frac{2r^2}{\sin \alpha} + r^2 \sqrt{\left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha \right)^2 - \left(\frac{d}{2r} \right)^2} + r^2 \sqrt{\left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha \right)^2 - \left(\frac{d}{2r} \right)^2}, \quad (2.64)$$

де:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{\sin \alpha}, \quad (2.65)$$

$$\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} - \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{\sin \alpha} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha, \quad (2.66)$$

$$1 + \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{ctg} \alpha}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha} = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{ctg} \alpha} = 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} = 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (2.67)$$

Отже, формула площі вдавлення гексагонального типу така:

$$\begin{aligned} S_1 &= r^2 \cdot \frac{d}{2r} \cdot 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \arcsin \left(\frac{d}{2r} \sin \alpha \right) - \frac{2r^2}{\sin \alpha} + 2r^2 \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha} - \left(\frac{d}{2r} \right)^2} = \\ &= r^2 \cdot \frac{d}{2r} \cdot 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \arcsin \left(\frac{d}{2r} \sin \alpha \right) - \frac{2r^2}{\sin \alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r} \sin \alpha \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (2.68)$$

Відносна площа ПРМР становить:

$$T_{\text{оп}}(r, d, \alpha) = 8r^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\frac{d}{2r} \sin \alpha \right) \arcsin \left(\frac{d}{2r} \sin \alpha \right) - \frac{2r^2}{\sin \alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r} \sin \alpha \right)^2} \right). \quad (2.69)$$

Розв'язання задачі з визначення відносної площі ПРМР дає змогу оптимізувати технологічне забезпечення для раціонального вибору параметрів мікрогеометрії поверхонь деталей машин, що, у свою чергу, забезпечить підвищення параметрів якості поверхонь та їхньої надійності під час експлуатації. Аналітичні розрахунки забезпечення службових властивостей поверхонь циліндричних деталей дають змогу моделювати утворення регулярного МР з параметрами для підвищення експлуатаційних властивостей. Оскільки більшість циліндричних деталей працюють в умовах контактування, параметр відносної площі найбільш точно відображає зв'язок мікрогеометрії поверхні циліндричних деталей з експлуатаційними властивостями обладнання.

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

3.1. Моделювання впливу технологічних параметрів якісних показників при виготовленні деталей комплексною технологією на інтенсивність зношування

Застосування математичного моделювання у взаємодії із засобами обчислювальної техніки не лише надасть можливість оптимізувати обсяг експериментальних досліджень, а й сформувавши інструмент, який, у свою чергу, допоможе обрати найбільш раціональні параметри процесів виготовлення циліндричних деталей [77].

На основі аналізу літературних джерел виділено три основні групи факторів, які впливають на зношування деталей та вузлів поліграфічного устаткування.

Домінуюча група навантажень є складнопідрядним поняттям й об'єднує не лише фізичну дію, а й такі технологічні фактори, як обсяг накладів (через великі накладки швидше руйнуються поверхні деталей, оскільки обладнання працює довше), швидкість роботи машини, кількість змін, фарбовість тощо.

Другою групою факторів, що впливають на швидкість зносу, є процес виготовлення деталі, який поєднує параметри мікрогеометрії поверхні та її конструктивні особливості (точність обробки поверхні, жорсткість, форма, методи обробки, покриття поверхні, матеріал деталі тощо).

Третя група факторів включає виробничі процеси: сервіс (періодичність проведення сервісних оглядів, планових ремонтів, наявність системи контролю роботи обладнання, ефективність роботи сервісної служби або служби головного механіка), кліматичні умови (вологість повітря, температура в цеху), виробнича стратегія та якість підготовки персоналу [38].

Третя та зношування є процесами, що характеризуються великою кількістю складних кореляційних зв'язків між різноманітними факторами, яскраво вираженою залежністю зношування деталей від фізико-механічних властивостей складових елементів після вібраційного накатування й нанесення хромового покриття. Можливість керування [78]. цими факторами дозволило проводити дослідження зносостійкості з використанням багатфакторного експерименту.

Зв'язок між вхідними та вихідними параметрами має вигляд функції відгуку типу

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (3.1)$$

де $x_1, x_2, \dots, x_k$ – керовані фактори, що впливають на відгук системи, які можна фіксувати на певному рівні або варіювати у процесі експерименту (наприклад, зусилля вдавлювання, подача, товщина покриття, радіус деформівного інструменту) [79].

Вихідні параметри можуть бути використані як критерії оптимізації. Для дослідження процесів тертя вихідними параметрами є коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування, температура тертя тощо.

Як функцією відгуку беремо інтенсивність зношування I , а вихідні параметри – зусилля вдавлювання деформівного інструмента P ; радіус деформівного інструмента R ; подачу деформівного інструмента S ; товщини покриття a , тобто $I = \varphi(P, R, S, a)$.

Незалежні фактори обираємо, виходячи з таких передумов. Фактори, які впливають на зносостійкість, повинні мати певну область визначення, відповідати таким вимогам, як керованість, однозначність, сумісність між собою, можливість задання з достатньою для кількісного аналізу точністю; величина їх має залишатися сталою у процесі експерименту та впливати на залежні фактори. Незалежними факторами можуть бути: зусилля вдавлювання деформівного інструмента P – x_1 , Н; радіус деформівного інструмента R – x_2 , мм; подача деформівного інструмента S – x_3 , мм/об; товщина покриття a – x_4 , мкм. Ці фактори відповідають наведеним вище вимогам.

Для вирішення поставленого завдання застосовували план другого порядку, побудований на основі повного факторного експерименту.

Засіб центрального композиційного планування другого порядку дозволяє за допомогою отриманої моделі описувати поверхню відгуку з однаковою точністю в усіх напрямках на однаковій віддалі від центру плану [80]. При цьому точки плану (центральні точки, точки куба і «зіркові» точки) розміщено на трьох сферах.

Використаємо рототабельний центрально-композиційний план, що належить до центральних композиційних планів, в яких до ядра, що являє собою повний або дробовий факторний експеримент $N_\phi = 2^n$, додаються центральні (нульові) точки N_0 і «зіркові» точки $N_\alpha = 2n$ [81].

Кожна з незалежних змінних варіювалася на трьох рівнях: нижньому (-1), нульовому (0) та верхньому ($+1$):

$$-1 = \frac{x_{\min} - x_0}{\Delta x}, \quad 0 = \frac{x_0 - x_1}{\Delta x}, \quad +1 = \frac{x_{\max} - x_0}{\Delta x}, \quad (3.2)$$

де $x_{\max}$ – максимальне значення фактора;

$x_{\min}$ – мінімальне значення фактора;

x_0 – середнє значення фактора,

$$x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \quad (3.3)$$

Δx – інтервал варіювання,

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}. \quad (3.4)$$

Обрані рівні та інтервали варіювання наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Рівні факторів та інтервали варіювання

№ з/п	Фактори	Рівні факторів			Інтервал варіювання
		нижній -1	основний 0	верхній +1	
1	Зусилля вдавлювання деформівного інструмента X_1 , Н	200	250	300	50
2	Радіус деформівного інструмента X_2 , мм	2	2,5	3	0,5
3	Подача деформівного інструмента X_3 , мм/об	0,5	0,6	0,7	0,1
4	Товщина покриття X_4 , мкм	20	30	40	10

Згідно з планом експерименту проводимо вимірювання за заданих величин змінних факторів (зусилля вдавлювання деформівного інструмента, радіус деформівного інструмента, подача деформівного інструмента, товщина покриття).

На основі отриманих величин згідно з планом експерименту визначаємо величини масового зношування, які є точками відгуку системи на дію кожного окремого сполучення факторів, аналіз яких проводили на ПК.

Матрицю планування наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

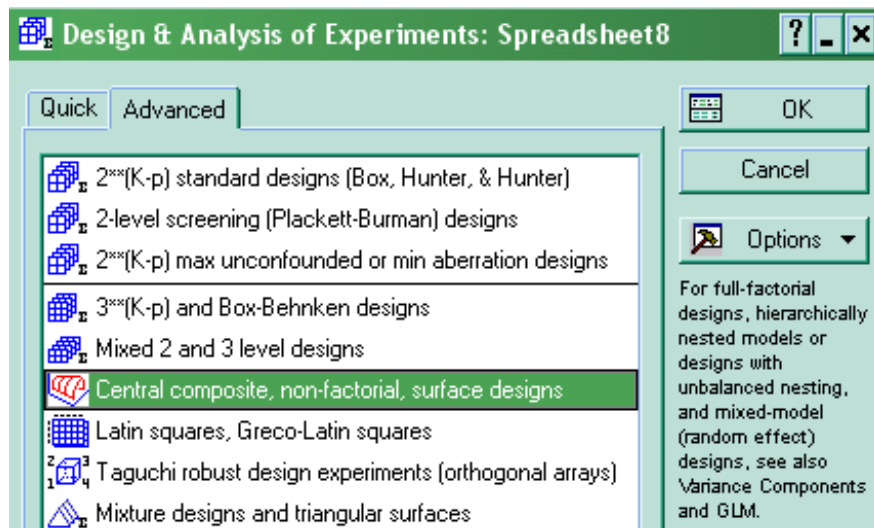
Матриця планування експерименту

Групи точок	q	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4
N_{Φ}	1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
	3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
	4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
	5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
	6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
	7	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
	8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
	9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
	10	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
	11	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1

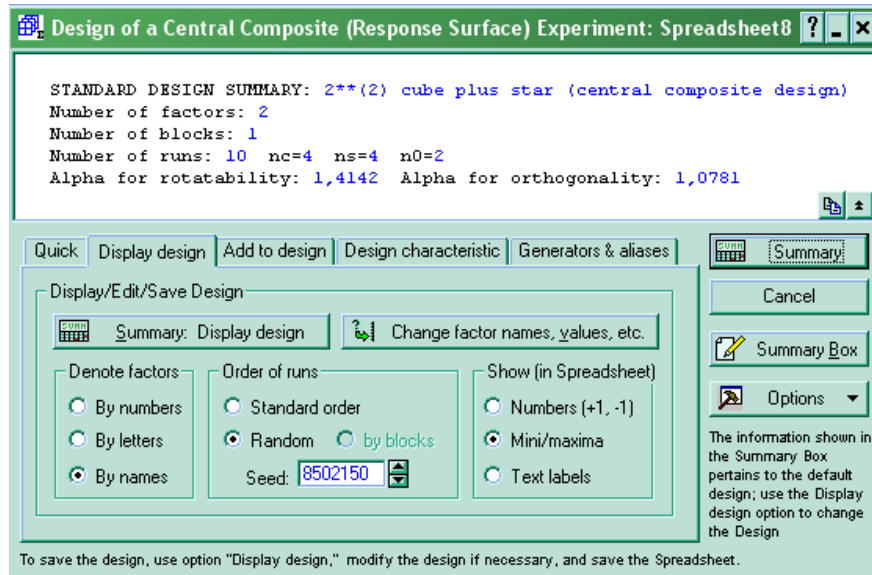
	12	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
	13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
	14	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
	15	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
	16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
N_α	17	+1	-2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	+1	+2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	+1	0	-2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	+1	0	+2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	+1	0	0	-2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
	22	+1	0	0	+2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
	23	+1	0	0	0	-2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
	24	+1	0	0	0	+2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
N_0	25	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Щоб знизити похибку визначення залежної змінної, потрібно провести серію паралельних дослідів у кожній точці матриці планування.

Обробку експериментальних даних проводили за допомогою пакета прикладних програм StatSoft STATISTICA 8.0.550 [82]. Запуск рототабельного центрально-композиційного плану й вікно задання параметрів показано на рис. 3.1.



a



б

Рис. 3.1. Діалогові вікна запуску (а) і задання параметрів (б) рототабельного центрально-композиційного плану експерименту

Факторам 1, 2, 3, 4 присвоєно відповідно імена «power» (P), «radius» (R), «feed» (S), «thickness» (a), введено їхні верхні, нижні та центральні значення плану експерименту (рис. 4.2).

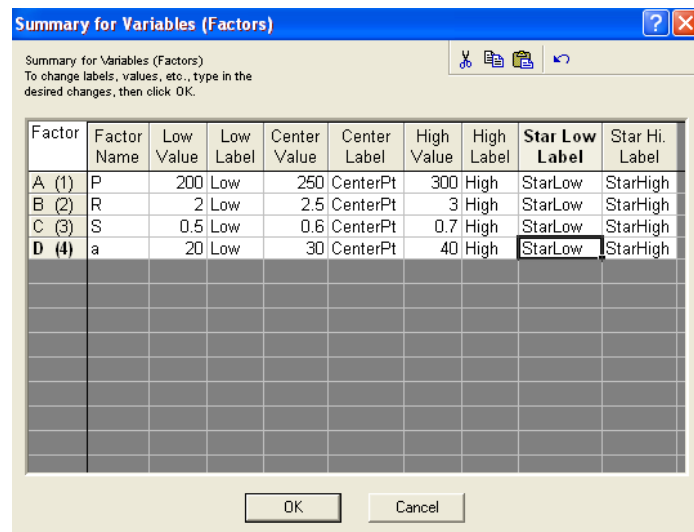


Рис. 3.2. Діалогове вікно введення значень рівнів факторів

Аналіз експериментальних даних проводили за допомогою спеціального модуля, де залежною змінною виступає вихідна величина (інтенсивного зношування), а в як змінні – фактори X_1 , X_2 , X_3 , X_4 .

Було побудовано робочу матрицю проведення експерименту (рис. 3.3) з натуральними значеннями рівнів варіювання факторів, відповідно до якої проводили дослідження, а отримані дані заносили в таблицю (табл. 3.3).

Workbook1*

Experimental Design

Design of centre

2**(4) central composite, nc=16 ns=8 n0=2

Standard Run	P	R	S	a
11	300.0000	2.000000	0.700000	20.00000
8	200.0000	3.000000	0.700000	40.00000
5	200.0000	3.000000	0.500000	20.00000
19	250.0000	1.500000	0.600000	30.00000
3	200.0000	2.000000	0.700000	20.00000
23	250.0000	2.500000	0.600000	10.00000
26 (C)	250.0000	2.500000	0.600000	30.00000
7	200.0000	3.000000	0.700000	20.00000
10	300.0000	2.000000	0.500000	40.00000
24	250.0000	2.500000	0.600000	50.00000
15	300.0000	3.000000	0.700000	20.00000
12	300.0000	2.000000	0.700000	40.00000
1	200.0000	2.000000	0.500000	20.00000
2	200.0000	2.000000	0.500000	40.00000
14	300.0000	3.000000	0.500000	40.00000
22	250.0000	2.500000	0.800000	30.00000
9	300.0000	2.000000	0.500000	20.00000
13	300.0000	3.000000	0.500000	20.00000
4	200.0000	2.000000	0.700000	40.00000
17	150.0000	2.500000	0.600000	30.00000
6	200.0000	3.000000	0.500000	40.00000
21	250.0000	2.500000	0.400000	30.00000
25 (C)	250.0000	2.500000	0.600000	30.00000
18	350.0000	2.500000	0.600000	30.00000
20	250.0000	3.500000	0.600000	30.00000
16	300.0000	3.000000	0.700000	40.00000

2**(4) central composite, nc=16 ns=8 n0=2 Runs=26 (Spreadsheet)

For Help, 1 C1.V1 300 CAPS NUM REC

Рис. 3.3. Діалогове вікно вибірки для проведення експерименту

Таблиця 3.3

Робоча матриця, рівні варіювання та результати досліджень

Кодові теоретичні значення рівнів варіювання факторів	Фактори				Функція
	Натуральне позначення факторів				Натуральне позначення функції
	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>I</i>
	Кодоване позначення факторів та натуральні значення їхніх рівнів				Кодоване позначення функції
$F_1 \dots F_5$	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
0	250	2,5	0,6	30	Середнє значення результатів досліджень
1	200	2	0,5	20	
2	300	3	0,7	40	
Дослід 1	250	3,5	0,6	30	
2	200	3	0,7	40	0,838
3	150	2,5	0,6	30	0,89
4	250	2,5	0,4	30	0,065
5	300	3	0,5	20	0,399
6	200	2	0,5	40	0,082
7	300	2	0,7	20	0,088
8	200	2	0,7	20	0,5
9	300	2	0,7	40	0,917
10	200	3	0,5	20	0,661
11	250	2,5	0,8	30	0,745
12	250	2,5	0,6	30	0,42
13	300	2	0,5	20	0,071
14	250	2,5	0,6	50	0,528
15	300	3	0,7	20	0,3
16	200	3	0,5	40	0,078
17	200	3	0,7	20	0,093
18	300	2	0,5	40	0,265
19	250	1,5	0,6	30	0,704
20	250	2,5	0,6	10	0,06
21	350	2,5	0,6	30	0,356
22	250	2,5	0,6	30	0,789
23	200	2	0,5	20	0,071
24	300	3	0,7	40	0,03
25	200	2	0,7	40	1,225
26	300	3	0,5	40	0,989
					0,399

Сума дисперсій становить 0,0128, максимальна дисперсія – 0,003, розрахункове значення *G*-критерію – 0,232, критичне значення – 0,687. Оскільки розрахункове значення менше за критичне, то дисперсія однорідна й можна розрахувати дисперсію відтворюваності, яка дорівнює 0,000 495.

Щоб виділити фактори, які чинять домінантний вплив на відгук системи, наведемо карту Паретто (рис. 3.4).

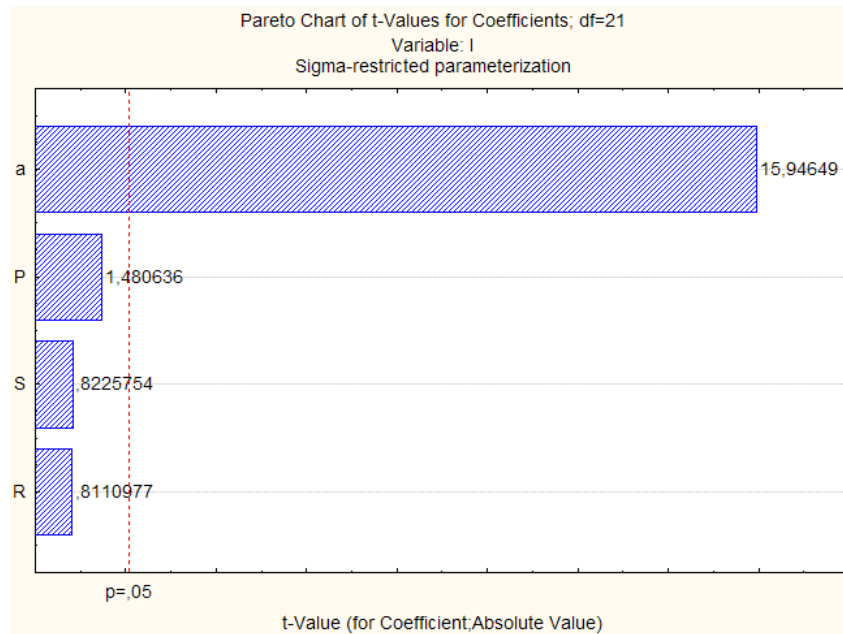
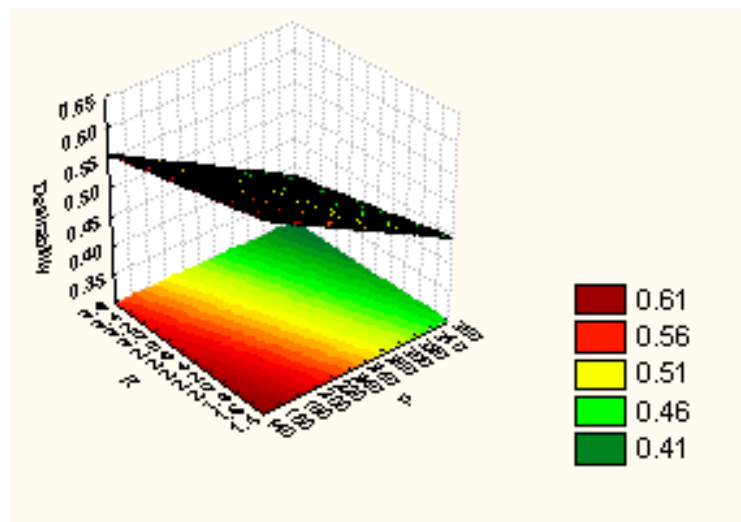


Рис. 3.4. Карта Паретто

Відповідно до рис. 3.4 найбільший вплив на відгук системи чинить такий статистично значимий ефект, як товщина зміцненого шару (лінійна складова), оскільки лінійні складові містяться збоку від лінії нормального розподілу.

Щоб визначити вплив кожного фактора на інтенсивність зношування, покажемо відповідні поверхні відгуку (рис. 3.5–3.10).

Рис. 3.5. Поверхня відгуку в разі зміни факторів $\bar{X}_1$ та $\bar{X}_2$

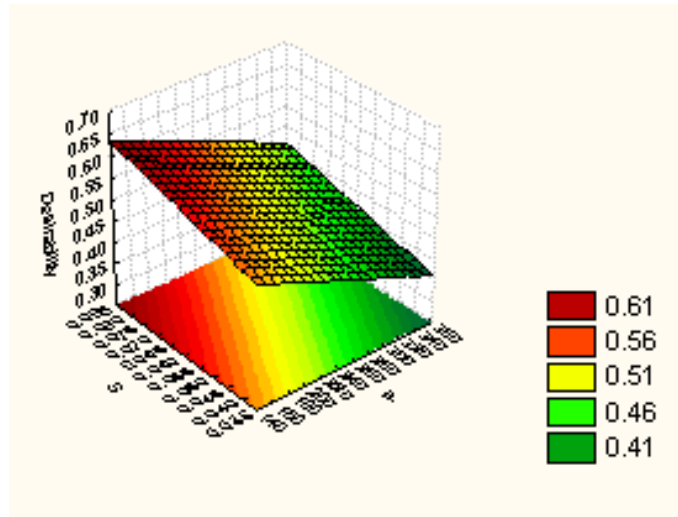


Рис. 3.6. Поверхні відгуку у разі зміни факторів $\bar{X}_1$ та $\bar{X}_3$

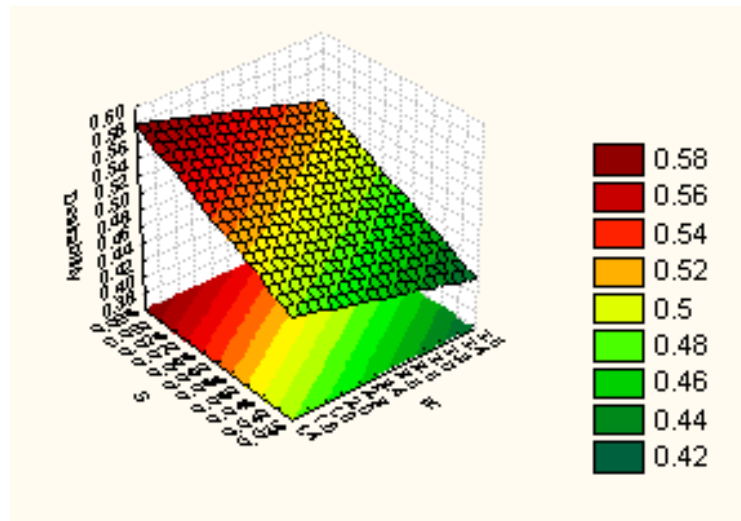


Рис. 3.7. Поверхні відгуку у разі зміни факторів $\bar{X}_2$ та $\bar{X}_3$

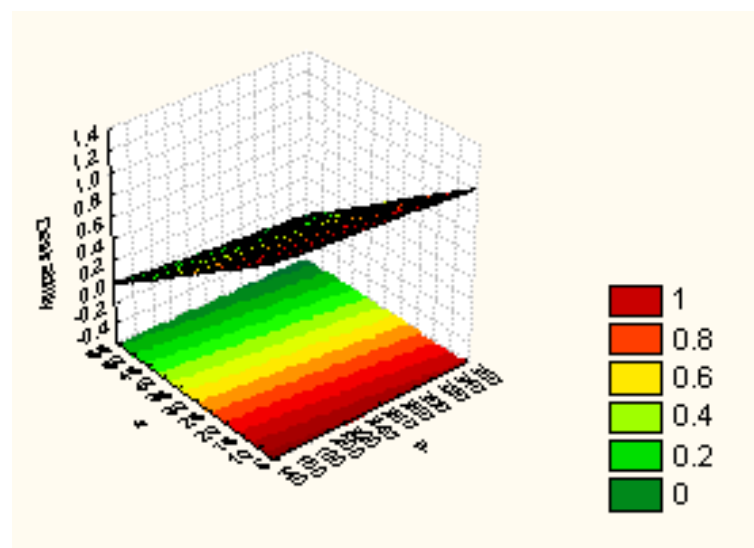


Рис. 3.8. Поверхні відгуку у разі зміни факторів $\bar{X}_4$ та $\bar{X}_1$

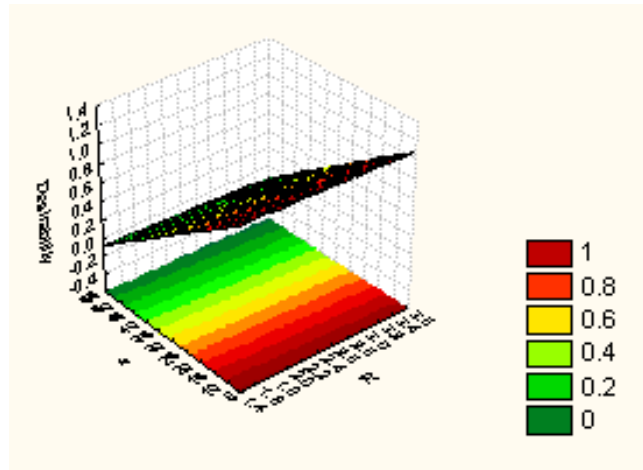


Рис. 3.9. Поверхні відгуку у разі зміни факторів $\bar{X}_2$ та $\bar{X}_4$

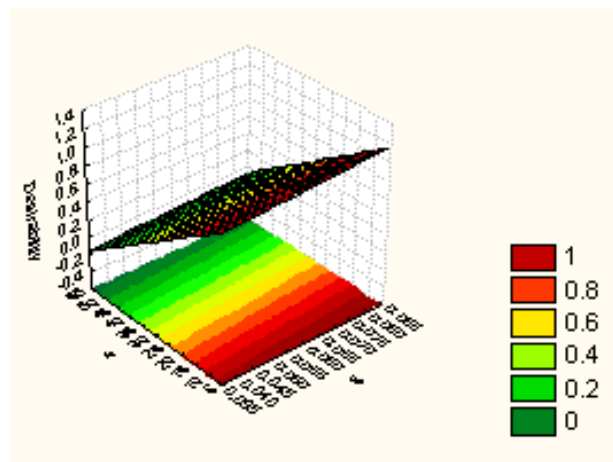


Рис. 3.10. Поверхні відгуку у разі зміни факторів $\bar{X}_3$ та $\bar{X}_4$

На основі аналізу поверхонь відгуку (рис. 3.5–3.10) можна зробити висновок, що зі збільшенням зусилля вдавлення ($\bar{X}_1$) і товщини хромованого шару ($\bar{X}_4$) інтенсивність зношування зменшується, а зі збільшенням радіуса ($\bar{X}_2$) і величини подачі деформівного елемента ($\bar{X}_3$) – збільшується. Це пов'язано зі змінами як структури поверхневих шарів матеріалу, так і з величинами стискних напружень у зоні прикладання навантаження. Потрібно також зауважити, що це твердження справедливе для товщини хромованого шару від 10 до 50 мкм, адже нарощування хромованого шару може призвести до відшаровування від поверхні у зв'язку з його високою крихкістю, що пов'язано з високою твердістю хрому.

Наведемо математичну залежність у кодованих змінних:

$$I = (\exp(-2,382\,68 - 0,704\,63x_1 + 5,724\,73x_2 + 7,019\,65x_3 + 0,594\,15x_4 + 2,237x_1x_2 - 7,055\,03x_2x_3))^{1/2},$$

де x_i – кодовані змінні,

$$x_i = \frac{x_i - \bar{X}_i}{\Delta X};$$

$$\bar{X}_i = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2};$$

$$\Delta X = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2};$$

$\bar{X}_i$ – середнє значення;

$X_{i\max}$ та $X_{i\min}$ – максимальнє і мінімальнє значення відповідно;

ΔX – інтервал варіювання.

Застосування методики регресійного аналізу комплексного технологічного процесу дозволяє у визначених на етапі експерименту у межах та із заданою точністю здійснити керування режимами обробки, що, у свою чергу, дає можливість отримати підвищення експлуатаційних властивостей, таких як зносостійкість деталей поліграфічних машин.

3.2. Моделювання впливу технологічних параметрів на якість поліграфічної продукції

Одним з основних параметрів якості відбитка є розтискування крапки. Через недостатню кількість інформації щодо механізму впливу на розтискування крапки параметрів поверхні циліндричних деталей (наприклад, вали друкарських машин), застосовано теорію планування експерименту. Це дозволяє виявити критерії оптимізації стабільного перебігу технологічного процесу, скоротити час та матеріальні витрати [83].

Використовуючи параметричну систему, розглянуту в розд. 2, та метод експертної оцінки ми отримали середній апріорний ранжований ряд факторів, що впливають на розтискування растрової крапки, а також визначили межі зміни цих факторів, методи і точність їх вимірювання.

Після аналізу проведеного ранжирування до матриці планування увійшли такі керовані фактори: шорсткість поверхні R_a – X_1 , мікротвердість M – X_2 , товщина фарбового шару T – X_3 , тиск у друкарському процесі P – X_4 .

Якісний результат планування експерименту залежить від якості первинної інформації. Під час планування експерименту було дотримано всіх вимог теорії планування:

- було виключено систематичні помилки;
- експерименти відбувалися відповідно до плану і методики;
- повторні досліді проводили в однакових умовах;
- в експерименті використовували результати повторних дослідів;
- під час проведення експериментів застосовували рандомізацію;
- для експерименту обирали параметри, які мають однорідні властивості [84, 85, 86].

За результатами експериментів поверхні друкарського циліндра після обробки методом вібраційного накатування з утворенням повністю регулярного МР

гексагонального типу ввігнутої форми та хромування було отримано значення шорсткості поверхні R_a , мікротвердості M , товщини фарбового шару T , а також тиску у друкарському процесі P .

Модель будували за планом повного факторного експерименту. Це найпоширеніший тип планів першого порядку, реалізація якого відбувається через знаходження досліджуваної функції за всіх можливих комбінацій рівнів варіювання факторів. Аналізували головні ефекти й усі взаємодії (подвійні, потрійні та четверні). Для побудови моделі у знайдений області факторного простору для кожного фактора обрали два рівні варіювання. Матриця була ортонормована. Побудова моделі виконувалася з використанням програмного засобу PRIAM (планування, регресія і аналіз моделей).

Обрані рівні та інтервали варіювання наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Рівні факторів та інтервали варіювання

№ з/п	Фактори	Рівні факторів			Інтервал
		min	0	max	
1	Шорсткість поверхні X_1	0,63	0,94	1,25	0,31
2	Мікротвердість X_2 , МПа	6440	7950	9460	1510
3	Товщина фарбового шару X_3 , мкм	0,7	2,1	3,5	1,4
4	Тиск в друкарському процесі X_4 , МПа	0,4	1,2	2,0	0,8

Після виконання експериментів було проведено обробку результатів:

а) перевіряли однорідність дисперсій та розраховували дисперсії відтворюваності за допомогою критерію Кохрена за формулою

$$G_{\text{експ}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (3.5)$$

де S_{max}^2 – максимальна із дисперсій;

S_u^2 – дисперсії, розраховано щодо кожного досліджу.

Результат експериментів порівнювали із критичним значенням – якщо виконувалась умова $G_{\text{експ}} < G_{\alpha, n-1, N}^{\text{крит}}$, це свідчило про однорідність дисперсій;

б) перевіряли значущість коефіцієнта регресії з використанням критерію Стюдента (для ортонормованої матриці) за формулою

$$t = \frac{b_i \sqrt{n}}{S_{\text{відт}} \sqrt{c_{ii}}}, \quad (3.6)$$

де $S_{\text{відт}}$ – середнє квадратичне відхилення;

c_{ii} – діагональний елемент матриці дисперсій.

Якщо виконується умова $t > t_{\alpha, V_{\text{відт}}}$, то коефіцієнт значимий.

Наступним кроком було проведення аналізу властивостей побудованої моделі. Основними показниками якості моделі слугують такі властивості: інформативність, адекватність, стійкість. Щоб оцінити інформативність, використовували величину множинного коефіцієнта кореляції R , а саме, коефіцієнт кореляції між експериментальним значенням відгуку та значенням відгуку, розрахованим за моделлю. Розрахунок виконували за формулою

$$R^2 = Q_R / Q_{\text{заг}}, \quad (3.7)$$

де R^2 – величина, яка показує частку загальної суми квадратів, що пояснюється моделлю.

Значення R має бути якнайближче до одиниці.

Адекватність моделей перевіряли за критерієм Фішера, якщо виконувалась умова $F_{\text{експ}} < F_{\text{крит}}$, різницю дисперсій вважали незначною, а модель адекватною.

Під час аналізу стійкості розглядали таблиці мультиколінеарності та число обумовленості cond. Ідеальне значення cond дорівнює одиниці.

Розподіл сили впливу регресорів унаочнено на рис. 3.11.

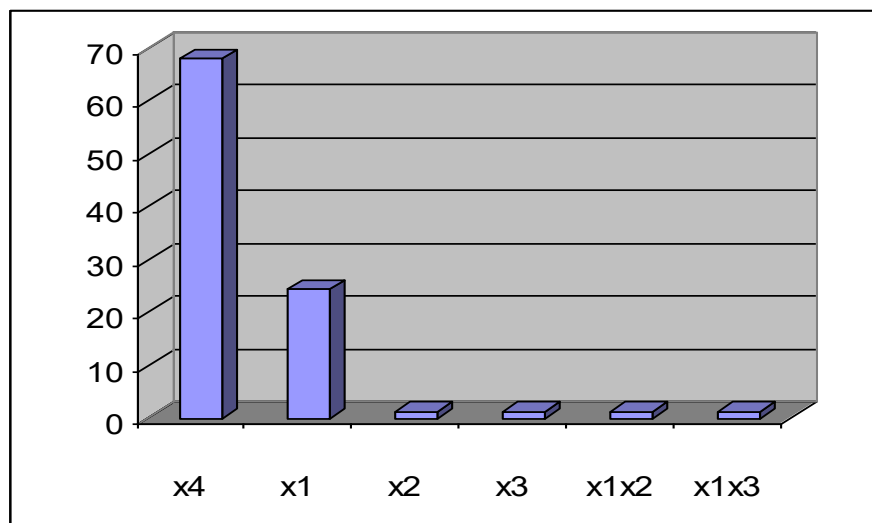


Рис. 3.11. Розподіл сили впливу факторів

Дані рис. 3.11 дозволяють отримати аналіз структури зв'язків. Силу впливу визначають як частку участі регресора, яку розраховують як відношення суми квадратів певного регресора до загальної суми квадратів. За нормальних обставин сила впливу ефектів зменшується за експоненціальною залежністю.

Експеримент проводили на трьох видах паперу: крейдованому глянцевою папері 120 г/м² фірми Blu Star Gloss, крейдованому матовому папері 130 г/м² Arctic та

офсетному папері 80 г/м² Lumiset. Залежна змінна – величина розтискування, а змінними є X_1, X_2, X_3, X_4 .

Значення розтискування крапки вимірювали на шкалі оперативного контролю в полях 40 % та 80 %.

Відповідно до проведених експериментів за допомогою програмного забезпечення PRIAM було отримано:

- модель розрахунку растрової крапки на крейдованому глянцевого папері Blu Star Gloss, 120 г/м²(поле 80 %):

$$Y = 8,229 + 0,687x_1 + 0,562x_4;$$

- модель розрахунку растрової крапки на крейдованому матовому папері Arctic, 130 г/м² (поле 80 %):

$$Y = 9,604 + 0,562x_1 + 0,437x_3 + 0,437x_4;$$

- модель розрахунку растрової крапки на офсетному папері Lumiset 80 г/м² (поле 40 %):

$$Y = 15,708 + 1,375x_4 + 0,792x_1 + 0,25x_3;$$

- модель розрахунку растрової крапки на офсетному папері Lumiset 80 г/м² (поле 80 %):

$$Y = 11,875 + 0,792x_4 + 0,625x_1 - 0,208x_1x_2 + 0,166x_1x_3x_4;$$

- модель розрахунку растрової крапки, де враховували взаємодію параметрів шорсткості та мікротвердості поверхневого шару циліндра, товщину фарбового шару, тиск у процесі друкування, поля з коефіцієнтом процентного покриття і матеріал:

$$Y = 12,416 - 2,513x_5 + 1,270x_6 + 0,958x_4 + 0,736x_1 + 0,552x_5x_6 - 0,361x_4x_5 + 0,166x_3 - 0,215x_3x_5x_6 + 0,208x_6 + 0,111x_1x_4 - 0,111x_1x_5 + 0,125x_1x_3x_6 - 0,114x_2x_5x_6 + 0,530x_1x_2x_3x_5x_6 + 0,125x_4x_6,$$

де:

$$x_1 = 3,226 \times (X_1 - 0,94);$$

$$x_2 = 0,0007 \times (X_2 - 7950);$$

$$x_3 = 0,714 \times (X_3 - 2,1);$$

$$x_4 = 1,25 \times (X_4 - 1,2);$$

$$x_5 = 0,05 \times (X_5 - 60);$$

$$x_6 = 1 \times (X_6 - 2);$$

$$z_6 = 1,5 \times (X_6 - 0,67).$$

За даними експериментальних досліджень було побудовано робочу матрицю (табл. 3.5) для крейдованого глянцевого паперу Blu Star Gloss, 120 г/м² (поле 40 %).

Таблица 3.5

Робоча матриця, рівні варіювання, результати досліджень для крейдованого
глянцевого паперу (поле 40 %)

Номер досліджу	Фактори				Функція			
	R_a	M	T	P				
	X_1	X_2	X_3	X_4	y			Середнє значення
Дослід 1	0,63	6440	0,7	0,4	11	12	13	12
2	1,25	6440	0,7	0,4	13	13	14	13,3
3	0,63	9460	0,7	0,4	11	11	12	11,3
4	1,25	9460	0,7	0,4	14	14	13	13,6
5	0,63	6440	3,5	0,4	13	13	14	13,3
6	1,25	6440	3,5	0,4	14	14	13	13,6
7	0,63	9460	3,5	0,4	12	12	13	12,3
8	1,25	9460	3,5	0,4	14	14	13	13,6
9	0,63	6440	0,7	2,0	15	15	14	14,6
10	1,25	6440	0,7	2,0	17	17	16	16,6
11	0,63	9460	0,7	2,0	14	14	15	14,3
12	1,25	9460	0,7	2,0	17	17	16	16,6
13	0,63	6440	3,5	2,0	16	15	15	15,3
14	1,25	6440	3,5	2,0	17	17	16	16,6
15	0,63	9460	3,5	2,0	14	14	15	14,3
16	1,25	9460	3,5	2,0	16	16	17	16,3

Отримано модель розрахунку растрової крапки на крейдованому глянцевому папері Blu Star Gloss, 120 г/м² (поле 40 %):

$$Y = 14,271 + 1,354x_4 + 0,812x_1 + 0,187x_2 + 0,187x_3 + 0,187x_1x_2 + 0,187x_1x_3,$$

де:

$$x_1 = 3,226 \times (X_1 - 0,94);$$

$$x_2 = 0,0007 \times (X_2 - 7950);$$

$$x_3 = 0,714 \times (X_3 - 2,1);$$

$$x_4 = 1,25 \times (X_4 - 1,2).$$

Після отримання експериментальних значень було проведено попередню обробку результатів. Модель адекватна ($F_{\text{експ}} = 3,351 < F_{\text{крит}} = 3,374$), стійка (ортогональна з $\text{Cond} = 1$), з добрими описовими та інформаційними характеристиками ($\gamma = 3$). Дисперсії експериментів однорідні.

Статистичні характеристики моделі наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Статистичні характеристики моделі

Статистичні характеристики		Умовні позначення	Значення
$\bar{\sigma}$	Дисперсія відтворюваності	$S_{\text{відт}}^2$	0,375

	Експериментальне значення G -критерію	$G_{\text{експ}}$	0,166
	Критичне значення G -критерію для $\alpha = 0,05$; $\nu_1 = 16$; $\nu_2 = 32$	$G_{\text{крит}}$	0,319
	Висновок про однорідність дисперсій	Однорідна	
Адекватність	Залишкова дисперсія	$S_{\text{зал}}^2$	0,112
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	3,351
	Критичне значення F -критерію для $\alpha = 0,05$; $\nu_1 = 6$; $\nu_2 = 9$	$F_{\text{крит}}$	3,374
	Висновок про адекватність	Адекватна	
Інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,988
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	62,793
	Критичне значення F -критерію для $\alpha = 0,05$; $\nu_1 = 6$; $\nu_2 = 41$	$F_{\text{крит}}$	2,240
	Значення параметра γ для критерію Бокса –Веца	γ	3
	Інформативність моделі	Добра	
Стійкість	Число обумовленості	Cond	1
	Стійкість обчислювальна	Ідеальна	
	Максимальний коефіцієнт кореляції між регресорами	Ортогональна	
	Стійкість структури	Ідеальна	
Описування	Частка розсіяння, яку пояснює модель, %	$Q_{\hat{y}}$	97,67
	Середня похибка, %	$\bar{e}_u$	1,46
	Середня абсолютна похибка	Δ_u	0,208
	Описові властивості	Добрі	

На основі отриманих результатів під час дослідження крейдованого глянцевого паперу побудовано графіки впливу поверхневих параметрів на розтискування крапки (рис. 3.12–3.17).

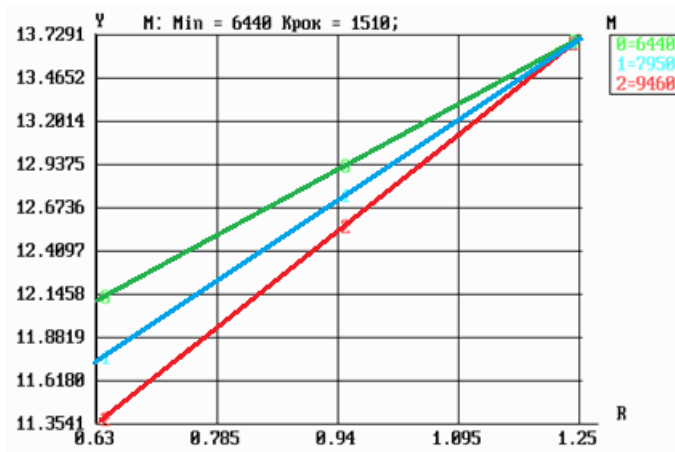


Рис. 3.12. Вплив шорсткості поверхні R_a та мікротвердості M на розтискування крапки

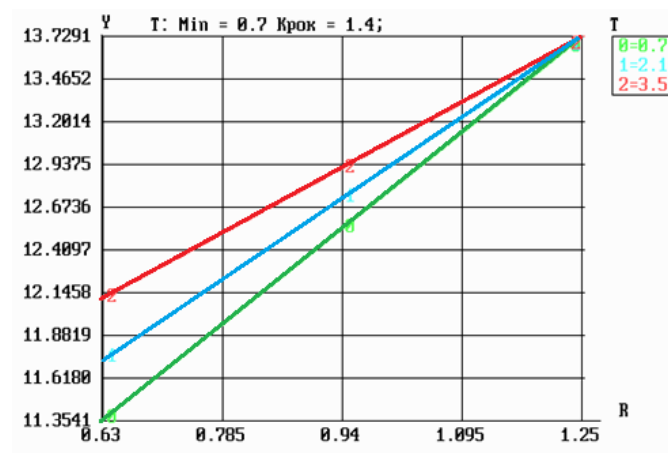


Рис. 3.13. Вплив шорсткості поверхні R_a та товщини шару фарби T на розтискування крапки

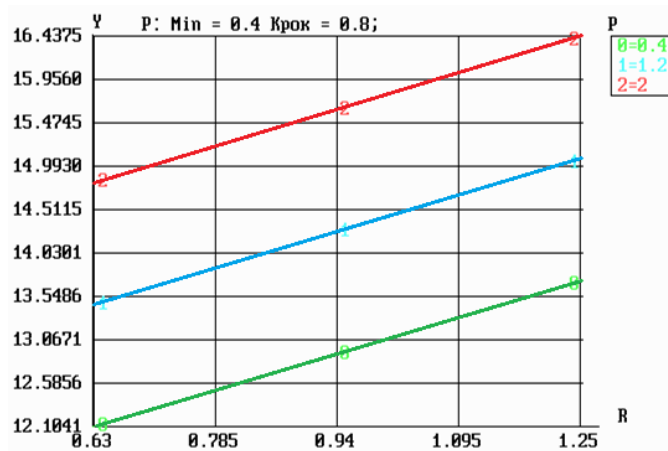


Рис. 3.14. Вплив шорсткості поверхні R_a та тиску P на розтискування крапки

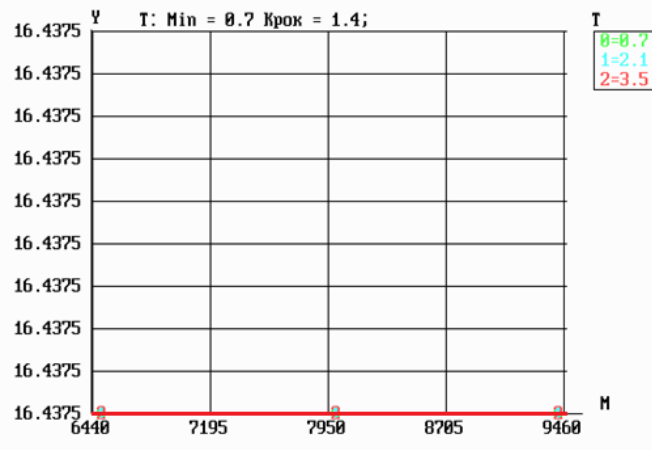


Рис. 3.15. Вплив мікротвердості M та товщини шару фарби T на розтискування крапки

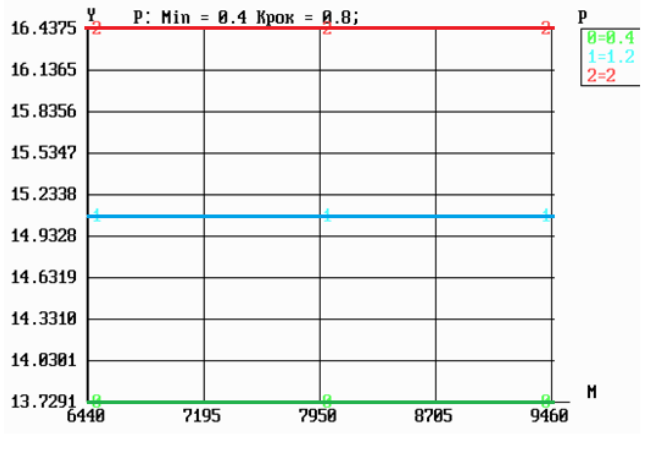


Рис. 3.16. Вплив мікротвердості M та тиску P на розтискування крапки

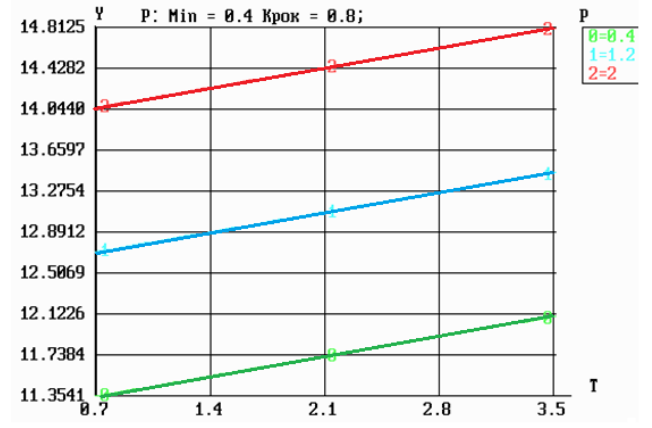


Рис. 3.17. Вплив товщини шару фарби T та тиску P на розтискування крапки

Аналіз результатів на крейдованому папері Blu Star Gloss показує різний характер впливу взаємодії таких факторів, як шорсткість поверхні друкарського циліндра, мікротвердості, товщини фарбового шару та тиску у друкарському процесі, а саме:

- рис. 3.12 – зі зростанням $R_a = 0,63 \dots 1,25$ і в разі переходу мікротвердості $M = 6440 \dots 9460$ (за фіксованих величин товщини фарбового шару $T = 0,7$ та тиску $P = 0,4$) показник розтискування буде зростати від 11,3 до 12,1;
- рис. 3.13 – зі зростанням $R_a = 0,63 \dots 1,25$ і в разі переходу товщини фарбового шару $T = 0,7 \dots 3,5$ (за фіксованих величин мікротвердості $M = 9460$ та тиску $P = 0,4$) показник розтискування перебуватиме в межах від 11,35 до 11,9;
- рис. 3.14 – шорсткість поверхні R_a та тиск P за фіксованих величин мікротвердості M і товщини фарбового шару T між собою не взаємодіють, але параметр розтискування крапки пропорційно збільшується зі збільшенням параметра R_a та переходом тиску P від 0,4 до 2 МПа;
- рис. 3.15 – взаємодія факторів, таких як мікротвердість і товщина фарбового шару, впливу на розтискування крапки не має;
- рис. 3.16 – зі збільшенням мікротвердості M та в разі переходу тиску P від 0,4 до 2 МПа за фіксованих величин $R_a = 1,25$, $T = 3,5$, параметр розтискування крапки має сталі значення;
- рис. 3.17 – товщина фарбового шару T та P тиску за фіксованих величин M мікротвердості й R_a шорсткості поверхні між собою не взаємодіють, але параметр розтискування крапки пропорційно збільшується зі збільшенням параметра T та переходом тиску P від 0,4 до 2 МПа.

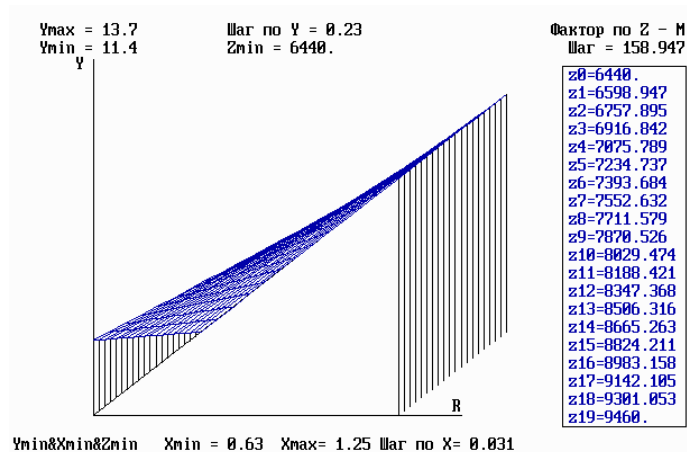


Рис. 3.18. Поверхня відгуку функції $y = f(X_1, X_2)$ залежно від окремих параметрів у площині їхніх дійсних значень (за $T = 0,7$; $P = 0,4$)

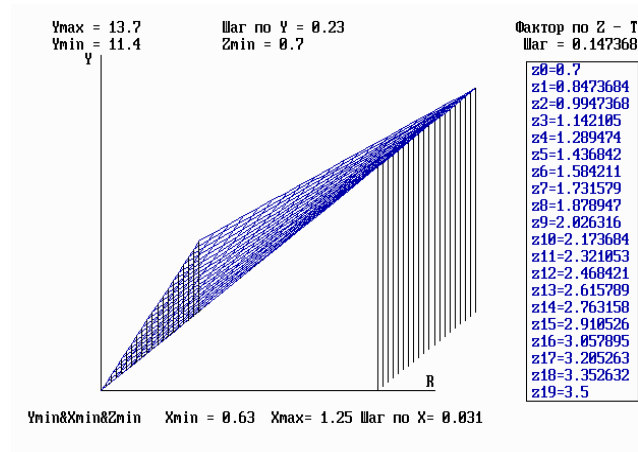


Рис. 3.19. Поверхня відгуку функції $y = f(X_1, X_3)$ залежно від окремих параметрів у площині їх дійсних значень (за $M = 9460$; $P = 0,4$)

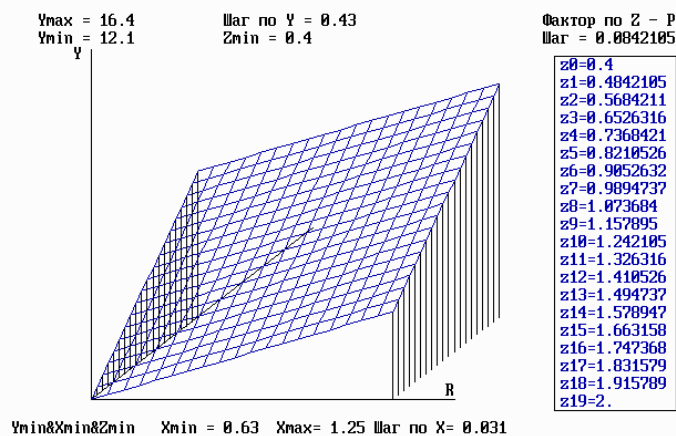


Рис. 3.20. Поверхня відгуку функції $y = f(X_1, X_4)$ залежно від окремих параметрів у площині їх дійсних значень (за $M = 9460$; $T = 3,5$)

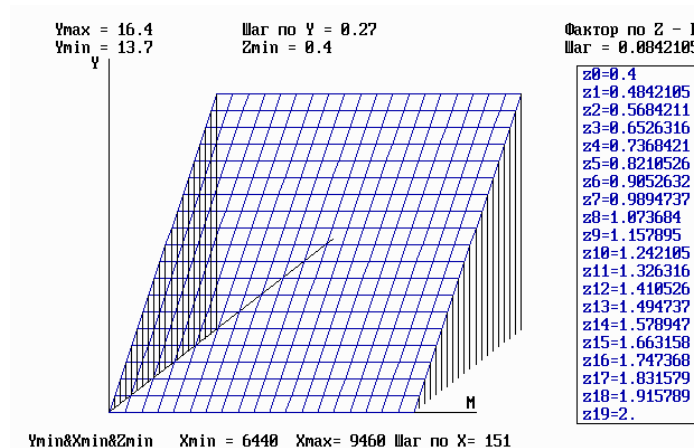


Рис. 3.21. Поверхня відгуку функції $y = f(X_2, X_4)$ залежно від окремих параметрів у площині їх дійсних значень (за $R_a = 1,25$; $T = 3,5$)

Для детальнішого аналізу таких факторів, як шорсткість та мікротвердість поверхні циліндричних деталей, товщини фарбового шару і тиску у друкарському

процесі на параметри розтискування крапки на рис. 3.18–3.21 подано просторові зображення відгуків.

За даними експериментальних досліджень побудовано робочу матрицю (табл. 3.7) для крейдованого матового паперу Arctic, 130 г/м² (поле 40 %).

Таблиця 3.7

Робоча матриця, рівні варіювання, результати досліджень для крейдованого матового паперу (поле 40 %)

Номер досліджу	Фактори				Функція			
	R_a	M	T	P	y			Середнє значення
	X_1	X_2	X_3	X_4				
Дослід 1	0,63	6440	0,7	0,4	12	12	13	12,3
2	1,25	6440	0,7	0,4	15	15	14	14,6
3	0,63	9460	0,7	0,4	13	12	13	12,6
4	1,25	9460	0,7	0,4	14	14	15	14,3
5	0,63	6440	3,5	0,4	12	13	13	13,3
6	1,25	6440	3,5	0,4	14	13	14	13,6
7	0,63	9460	3,5	0,4	12	13	14	13
8	1,25	9460	3,5	0,4	15	16	15	15,3
9	0,63	6440	0,7	2,0	15	15	14	14,6
10	1,25	6440	0,7	2,0	17	17	18	17,3
11	0,63	9460	0,7	2,0	15	16	16	15,6
12	1,25	9460	0,7	2,0	17	18	18	17,6
13	0,63	6440	3,5	2,0	16	15	15	15,3
14	1,25	6440	3,5	2,0	16	17	17	16,6
15	0,63	9460	3,5	2,0	14	15	15	14,6
16	1,25	9460	3,5	2,0	16	16	17	16,3

Наведемо модель розрахунку растрової крапки на крейдованому матовому папері Arctic, 130 г/м² (поле 40 %):

$$Y = 14,812 + 1,229X_4 + 0,937X_1 \dots 0,271X_2X_3X_4 \dots 0,187X_3X_4 + 0,187X_1X_2X_3,$$

де:

$$x_1 = 3,226 \times (X_1 - 0,94);$$

$$x_2 = 0,0007 \times (X_2 - 7950);$$

$$x_3 = 0,714 \times (X_3 - 2,1);$$

$$x_4 = 1,25 \times (X_4 - 1,2).$$

Після отримання експериментальних значень необхідно провести попередню обробку результатів. Модель адекватна ($F_{\text{експ}} = 3,033 < F_{\text{крит}} = 3,326$), стійка (ортогональна з $\text{Cond} = 1$), із добрими описовими й інформаційними характеристиками ($\gamma = 4$). Дисперсії експериментів однорідні.

Статистичні характеристики моделі наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Статистичні характеристики моделі

Статистичні характеристики		Умовні позначення	Значення
Однорідність	Дисперсія відтворюваності	$S_{\text{відт}}^2$	0,124
	Експериментальне значення G -критерію	$G_{\text{експ}}$	0,1667
	Критичне значення G -критерію для $\alpha = 0,05$; $\nu_1 = 16$; $\nu_2 = 2$	$G_{\text{крит}}$	0,319
	Висновок про однорідність дисперсій	Однорідна	
Адекватність	Залишкова дисперсія	$S_{\text{зал}}^2$	0,124
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	3,0337
	Критичне значення F -критерію для $\alpha = 0,05$; $\nu_1 = 5$; $\nu_2 = 10$	$F_{\text{експ}}$	3,326
	Висновок про адекватність	Адекватна	
Інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,985
	Експериментальне значення F -критерію	$F_{\text{експ}}$	65,584
	Критичне значення F -критерію для $\alpha = 0,05$; $\nu_1 = 5$; $\nu_2 = 42$	$F_{\text{експ}}$	2,438
	Значення параметра γ для критерію Бокса–Веца	γ	4
	Інформативність моделі	Висока	
Стійкість	Число обумовленості	Cond	1
	Стійкість обчислювальна	Ідеальна	
	Максимальний коефіцієнт кореляції між регресорами	Ортогональна	
	Стійкість структури	Ідеальна	
Описування	Частка розсіювання, яку пояснює модель, %	$Q_{\hat{y}}$	97,04
	Середня похибка, %	$\bar{e}_u$	1,59
	Середня абсолютна похибка	Δ_u	0,234
	Описові властивості	Добрі	

На основі отриманих результатів під час дослідження крейдованого матового паперу побудовано графіки впливу властивостей поверхні циліндричних деталей на розтискування крапки, зображені на рис. 3.22–3.26.

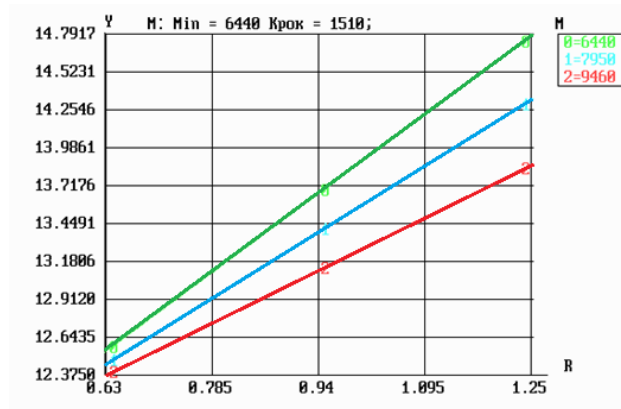


Рис. 3.22. Вплив шорсткості поверхні R_a та мікротвердості M на розтискування крапки

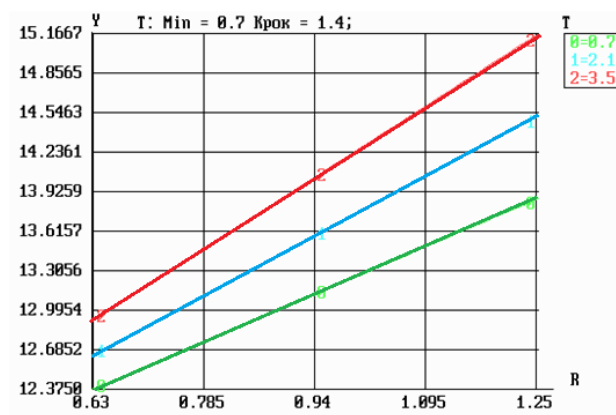


Рис. 3.23. Вплив шорсткості поверхні R_a та товщини шару фарби T на розтискування крапки

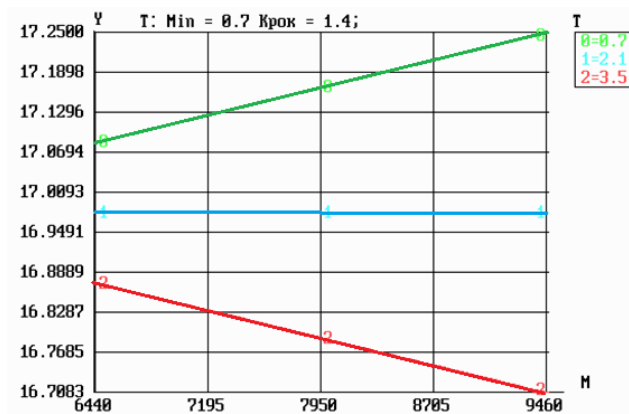


Рис. 3.24. Вплив мікротвердості M та товщини шару фарби T на розтискування крапки

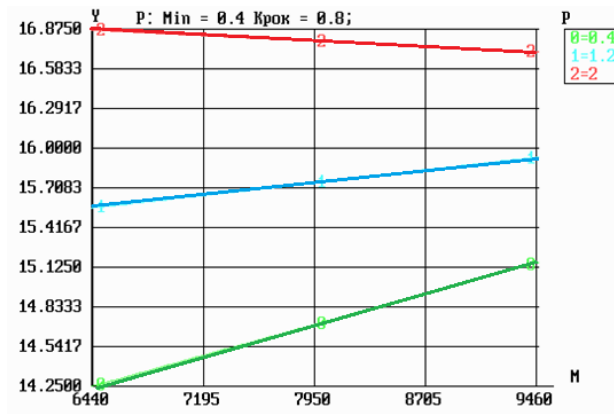


Рис. 3.25. Вплив мікротвердості M та тиску P на розтискування крапки

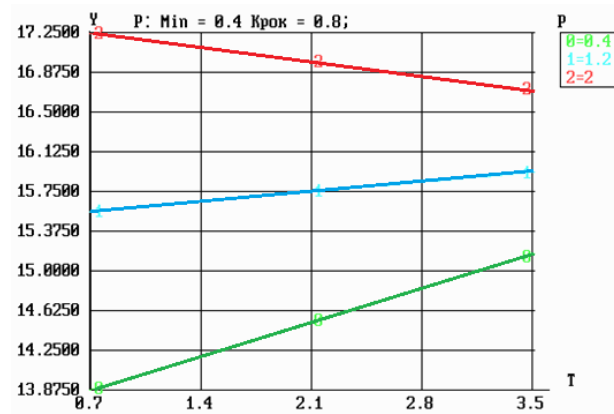


Рис. 3.26. Вплив товщини шару фарби T та тиску P на розтискування крапки

Рисунки 3.22–3.26 побудовано з початкових рівнянь регресії, де всім змінним, окрім двох, присвоюється фіксоване значення. Із цих двох одна залишається змінною, а друга набуває ряду значень, що створюється сімейством функцій [87, 88]. Аналізуючи результати, можна стверджувати про різний вплив взаємодії обраних факторів на параметр якості відбитка – розтискування крапки.

Дослідження на матовому папері Arctic показали такі результати:

– якщо $R_a = 0,63 \dots 1,25$ і в разі переходу мікротвердості $M = 6440 \dots 9460$ (за фіксованих величин товщини фарбового шару $T = 0,7$ та тиску $P = 0,4$), показник розтискування буде зростати від 12,3 до 12,55 (рис. 3.22);

– якщо $R_a = 0,63 \dots 1,25$ і в разі переходу товщини фарбового шару $T = 0,7 \dots 3,5$ (за фіксованих величин мікротвердості $M = 9460$ та тиску $P = 0,4$), показник розтискування буде зростати від 12,3 до 12,9 (рис. 3.23);

– якщо $M = 6440 \dots 9460$ і в разі переходу товщини фарбового шару $T = 0,7 \dots 3,5$ (за фіксованих величин шорсткості поверхні $R_a = 1,25$ та тиску $P = 2$), показник розтискування буде зростати від 16,86 до 17,09 (рис. 3.24);

– якщо $M = 6440 \dots 9460$ і в разі переходу тиску $P = 0,4 \dots 2$ (за фіксованих величин шорсткості поверхні $R_a = 1,25$ та товщини фарбового шару $T = 3,5$), показник розтискування буде зростати від 14,25 до 16,87 (рис. 3.25);

– якщо $T = 0,7 \dots 3,5$ і в разі переходу тиску $P = 0,4 \dots 2$ (за фіксованих величин шорсткості поверхні $R_a = 1,25$ та мікротвердості $M = 9460$), показник розтискування буде зростати від 13,87 до 17,25 (рис. 3.26).

Просторові відображення функцій відгуку унаочнено на рис. 3.27–3.32.

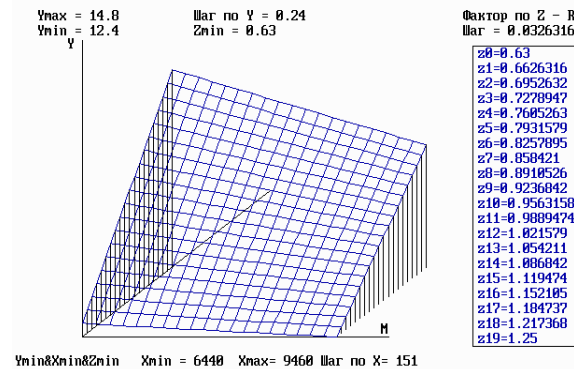


Рис. 3.27. Поверхня відгуку функції $y = f(X_2, X_1)$ залежно від окремих параметрів у площині їхніх дійсних значень (за $T = 0,7$; $P = 0,4$)

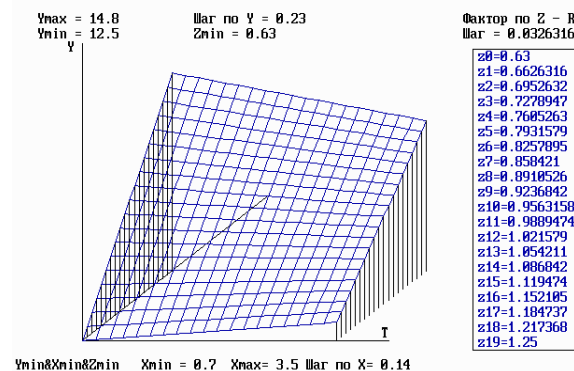


Рис. 3.28. Поверхня відгуку функції $y = f(X_3, X_1)$ залежно від окремих параметрів у площині їхніх дійсних значень (за $P = 0,4$; $M = 6440$)

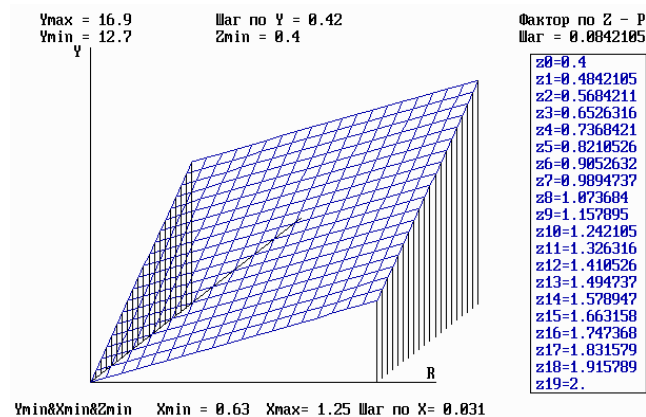


Рис. 3.29. Поверхня відгуку функції $y = f(X_1, X_4)$ залежно від окремих параметрів

у площині їхніх дійсних значень (за $M = 6440$; $T = 3,5$)

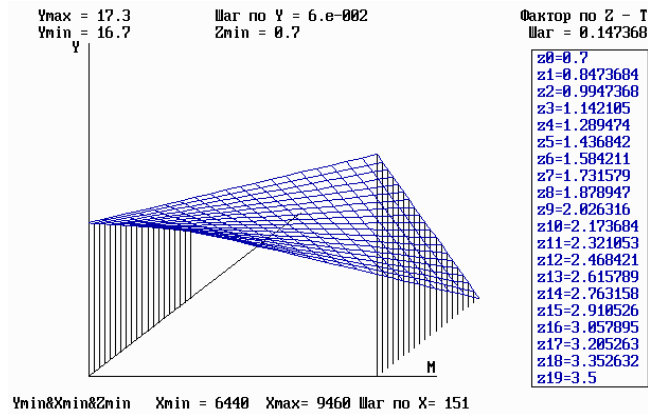


Рис. 3.30. Поверхня відгуку функції $y = f(X_2, X_3)$ залежно від окремих параметрів у площині їхніх дійсних значень (за $R_a = 1,25$; $P = 2,0$)

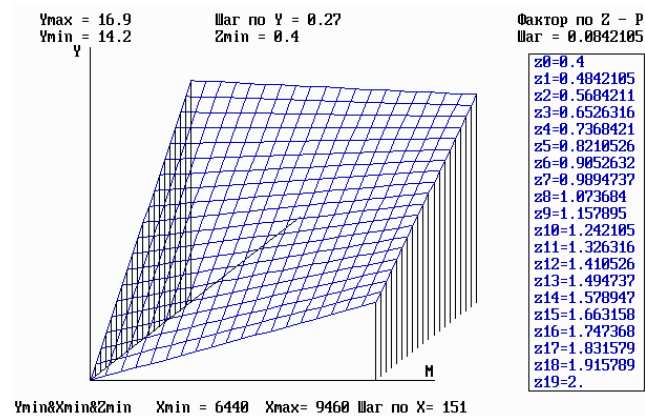


Рис. 3.31. Поверхня відгуку функції $y = f(X_2, X_4)$ залежно від окремих параметрів у площині їхніх дійсних значень (за $R_a = 1,25$; $T = 3,5$)

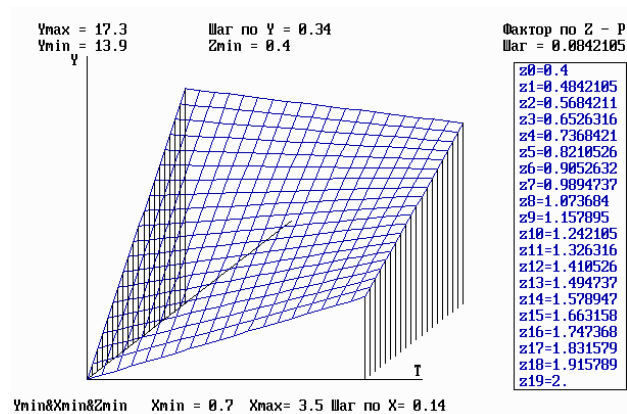


Рис. 3.32. Поверхня відгуку функції $y = f(X_3, X_4)$ залежно від окремих параметрів у площині їхніх дійсних значень (за $R_a = 1,25$; $M = 9460$)

Аналіз факторних просторів залежності параметра розтискування крапки, які зображені на рис. 3.18–3.21 та 3.27–3.32, показує, що найбільший вплив на величину розтискування крапки чинять такі фактори, як шорсткість поверхні друкарського

циліндра, товщина фарбового шару та тиск у друкарському процесі. Про це свідчать підйоми поверхонь відгуків відносно зростання шорсткості, збільшення товщини фарбового шару та тиску.

3.3. Моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару при зміцненні поверхні

Ресурс пристроїв у будь-яких машинах визначають здебільшого станом поверхневого шару, який формується у процесі фінішних операцій обробки поверхонь тертя.

Процес вібраційного накатування супроводжується додаванням зовнішнього статичного навантаження, яке створює пружну, а потім і пластичну деформацію поверхневого шару. Для області пружної деформації характерною є зміна напружень і деформацій, які поширюються у твердому тілі з високою швидкістю. Під час обробки поверхонь методами поверхневого деформування область максимуму залишкових напружень міститься на деякій глибині від поверхні, а на самій поверхні значення напружень значно знижуються. Залежно від конкретних режимів обробки, статичного тиску, процесів тертя, теплоутворення під час деформування, властивостей матеріалу деталі та інструмента, приповерхневий максимум напружень може бути на різних відстанях від поверхні, що істотно впливає на працездатність деталі [89].

Механізм формування залишкових напружень слід розглядати як наближену схему взаємодії деформаційних і теплових процесів. У процесі обробки кожна ділянка поверхні піддається багаторазовому впливу деформівного елемента, що викликає додаткове зміцнення. Під час нанесення покриття іони металу покриття проникають у поверхню за дислокаціями основного матеріалу, що спричиняє додаткове гальмування дислокацій і сповільнює швидкість їхнього переміщення до поверхні. Це дещо знижує рівень деформаційного зміцнення (зниження мікротвердості), а максимум залишкових напружень міститься на поверхні, що позитивно впливає на експлуатаційні властивості поверхні.

У реалізації запропонованого комплексного технологічного процесу основними значимими факторами контактної взаємодії інструмента і деталі, які формують параметри якості поверхневого шару деталі і впливають на процес формування напружено-деформованого стану поверхні (залишкових напружень), є зусилля контактної взаємодії деформівного елемента на поверхні деталі в зоні деформації, а також контактне тертя, яке виникає, коли інструмент переміщується між поверхнею деталі й деформівним елементом.

Основним завданням вібраційного накатування є створення залишкових напружень стискання у поверхневому шарі:

- 1) на силовому рівні вони утворюються внаслідок нерівномірності деформацій на глибину матеріалу (напруження 1-го роду);
- 2) на фізичному рівні вони проявляються унаслідок зміцнення матеріалу (напруження 3-го роду), а також подрібнення і взаємодії його зерен (напруження 2-го роду) [90, 91].

Моделювання поведінки деформівного елемента у процесі обробки ППД – складна математична задача. Для моделювання подібних за складністю задач слід використовувати числові методи, які розвинуті й нині активно застосовуються. Обираючи конкретний метод, слід враховувати не лише ефективність, власне, математичної процедури розрахунків, а й можливість програмного продукту забезпечити достатній рівень контролю за проведеними розрахунками.

Числове моделювання процесу вібраційного накатування виконано з використанням системи інженерного розрахунку CAD/CAE ANSYS, яка реалізує метод скінченних елементів. Розв'язували контактну задачу деформування пружно-пластичного фізичного нелінійного тіла абсолютно жорстким індентором. Під час розроблення моделі:

- 1) обрано розрахункову схему процесу;
- 2) прийнято припущення з урахуванням особливостей програмного продукту, який використовують для моделювання і розрахунку;
- 3) виконано геометричну побудову моделі;
- 4) обрано скінченні елементи і розбиття отриманої моделі;
- 5) задано фізико-механічні властивості матеріалу елементів моделі;
- 6) обрано контактні елементи і задано контакт між інструментом і деталлю;
- 7) задано граничні умови;
- 8) обрано рішення тестової задачі для верифікації моделі;
- 9) проаналізовано результати рішення [37].

Побудова моделі відповідала геометричним розмірам реальної контактної пари. Під час створення скінченно-елементної моделі значну увагу було приділено розбиттю області, в якій відбувається безпосередня контактна взаємодія між деформівним елементом і поверхнею, що піддається обробці, оскільки для отримання адекватного рішення рекомендується використовувати скінченні елементи, близькі за формою до правильних фігур.

Для моделювання процесу вібраційного накатування у системі ANSYS зроблено такі припущення:

- 1) у процесі скінченно-елементного аналізу деталей розглядають як безкінечну пластину (розміри були другого порядку малості порівняно з розмірами інструмента);
- 2) сферичний індентор абсолютно твердий;
- 3) процес вібраційного накатування є динамічним, а тому під час моделювання для спрощення постановки розв'язували квазідинамічну задачу, тобто у статичній постановці інструмента задавали не швидкість, а переміщення [92].

Для розв'язання задачі використовували зразки зі сталі 40 і за діаграмою зміцнення під час статичних досліджень отримали: модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа, межу міцності при розтягуванні $\sigma_b = 826,83$ МПа, границю текучості $\sigma_{0,2} = 512,2$ МПа. Далі модель використовували для розрахунку напружено-деформованого стану під час деформування деталі з конструкційних сталей.

Процес вібраційного накатування **ЧРМР** полягає у вдавлюванні сферичного індентора на глибину h у поверхню деталі з подачею S . Тертя в зоні контакту задають коефіцієнтом тертя $f_{тр}$, який дорівнює 0,05. Глибину вдавлювання індентора задавали 0,005 мм, що відповідає зусиллю 300 Н.

Враховуючи симетричність процесу, задачу можна спростити до плоскої постановки, що значно скорочує час для розрахунку процесу і дозволяє отримати максимальну точність розподілення напружень та деформацій у приповерхневому шарі деталі. Аналіз виконано в декартовій системі координат, яка пов'язана з оброблюваною деталлю.

Під час моделювання сферичному індентору задавали переміщення у напрямку осі абсцис u_x . Тертя в зоні контакту задавали коефіцієнтом тертя $f_{тр}$.

Моделювання скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану процесу вдавлювання сферичного інструмента в поверхню деталі виконували за допомогою вбудованих можливостей ANSYS та методу «зверху вниз» для створення скінченно-елементних моделей. Застосування цього методу виправдане відносною простотою геометрії розраховуваної конструкції. Він ґрунтується на такому підході: до побудови моделі застосовують набір геометричних примітивів, які повністю визначають лінії й поверхні. Після створення геометричних примітивів (прямокутника і півкола) система автоматично генерує об'єкти нижчого рівня (поверхні, лінії, об'єми) [93].

Щоб збільшити точність розрахунку напружень у приповерхневому шарі і зменшити час на розрахунки, пластину розбивали на скінченні елементи таким чином, щоб їхня найменша величина була на поверхні в зоні контакту.

Наступним етапом задавали граничні умови. Обмеження щодо ступенів вільності задавали відповідні до процесу обробки. Для всіх вузлів нижньої поверхні пластини задавали обмеження за всіма ступенями вільності, що відповідає консольному закріпленню.

Щоб перевірити правильність побудови моделі і достовірність результатів, розв'язували тестову задачу вдавлювання сферичного індентора у поверхню деталі відповідно до схеми обробки (рис. 3.33).

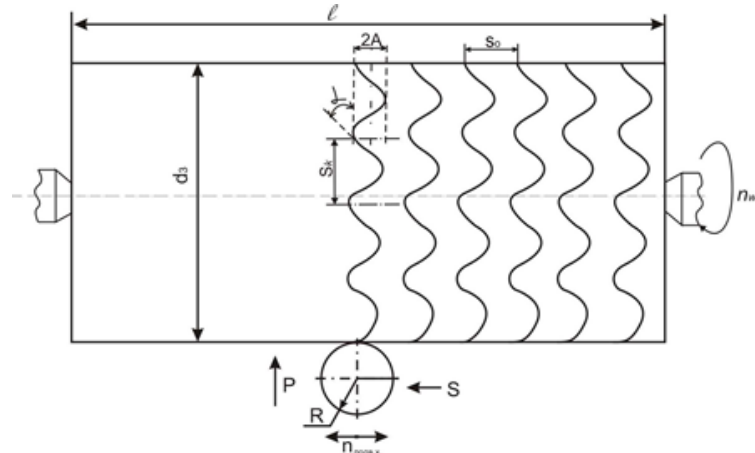


Рис. 3.33. Мікрорельєф поверхні, отриманий після обробки вібраційним накатуванням: A – амплітуда неперервної регулярно розміщеної нерівності; S_k – кутовий крок нерівностей; S_0 – осьовий крок нерівностей; α – кут сітки

Процес моделювання складається із двох етапів: вдавлювання сферичного індентора у поверхню пластини і наступного переміщення його вздовж поверхні.

Аналіз напружено-деформованого стану проводили на глибину деталі в зоні активної деформації сферичним індентором і в зоні, в якій було знято навантаження, що допомогло проаналізувати залишковий напружено-деформований стан деталі.

Ізолінії розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$ зображено на рис. 3.34. Результати розрахунків напружено-деформованого стану в момент вібраційного накатування й одразу після навантаження показано на рис. 3.35–3.47. На рис. 3.35–3.37 подано розподіл нормальних напружень σ_x , σ_y , σ_z , на рис. 3.38 – дотичних напружень τ_{xy} , на рис. 3.39–3.41. – деформацій ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} .

Ізолінії розподілу залишкових напружень ($\sigma_{\text{екв}}$, σ_z , σ_x) показано на рис. 3.42–3.44 і деформацій (ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy}) – на рис. 3.45–3.47.

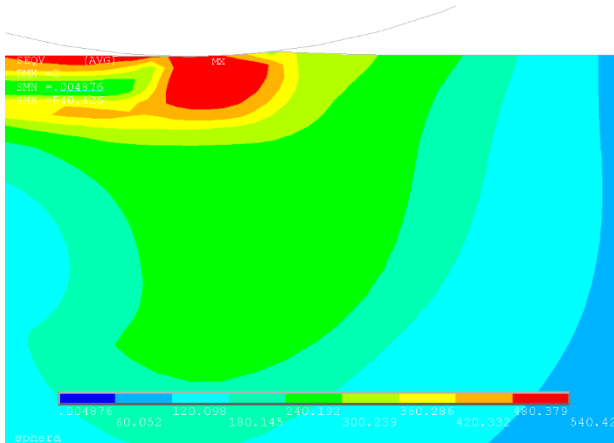


Рис. 3.34. Розподіл напружень $\sigma_{екв}$
у зразку під навантаженням

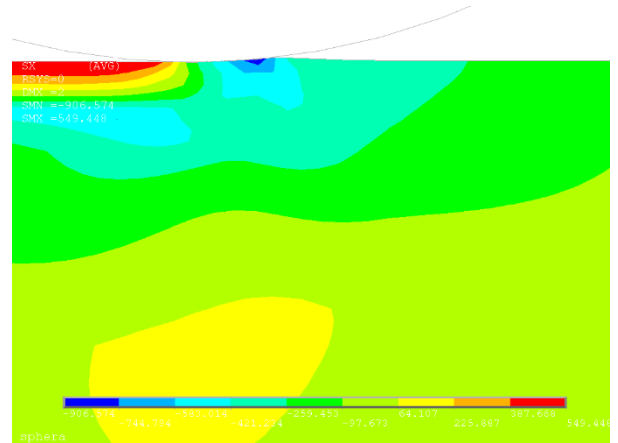


Рис. 3.35. Розподіл напружень σ_x
у зразку під навантаженням

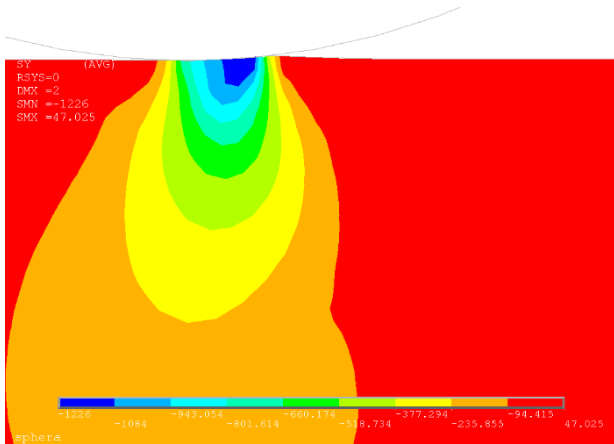


Рис. 3.36. Розподіл напружень σ_y
у зразку під навантаженням

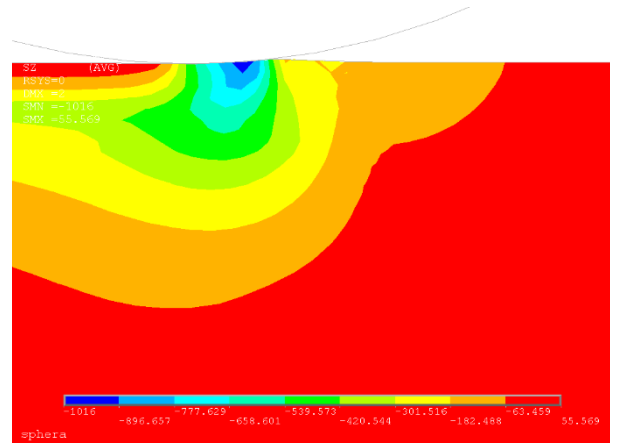


Рис. 3.37. Розподіл напружень σ_z
у зразку під навантаженням

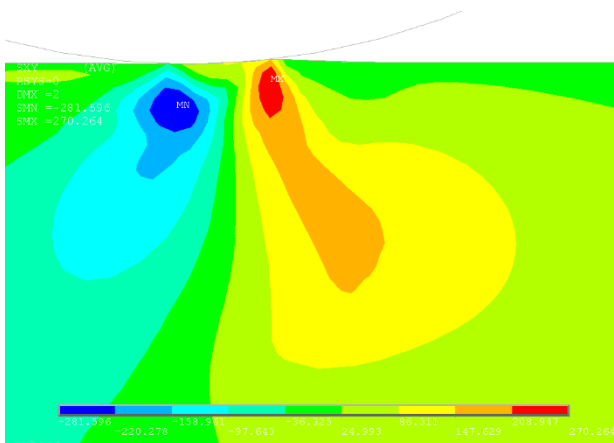


Рис. 3.38. Розподіл напружень τ_{xy}
у зразку під навантаженням

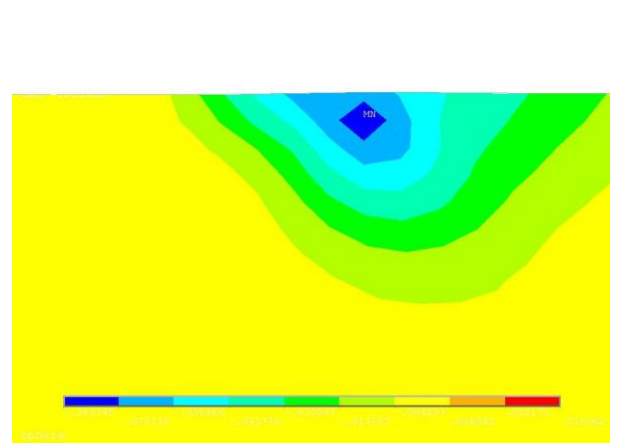


Рис. 3.39. Розподіл деформацій ϵ_y
у зразку під навантаженням

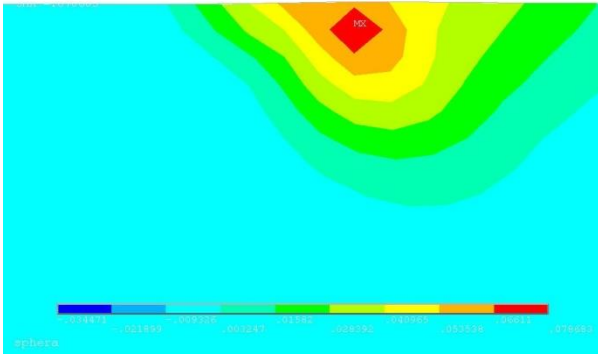


Рис. 3.40. Розподіл деформацій ε_x у зразку під навантаженням

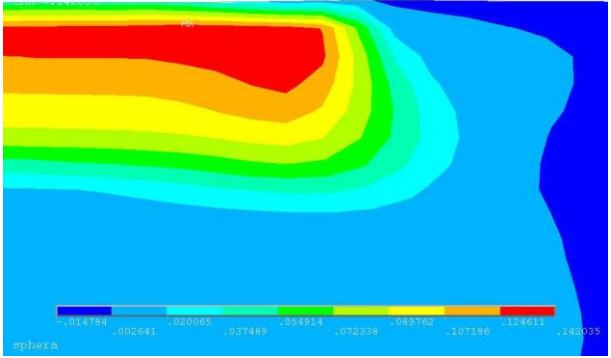


Рис. 3.41. Розподіл деформацій γ_{xy} у зразку під навантаженням

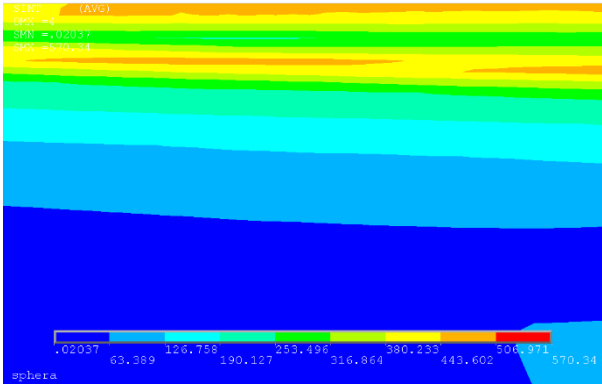


Рис. 3.42. Розподіл залишкових напружень σ_{eqv} у зразку

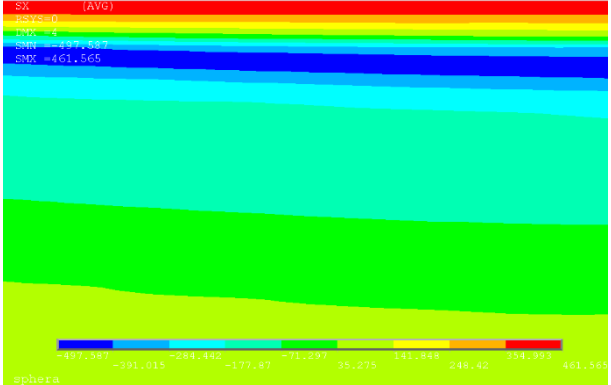


Рис. 3.43. Розподіл залишкових напружень σ_x у зразку

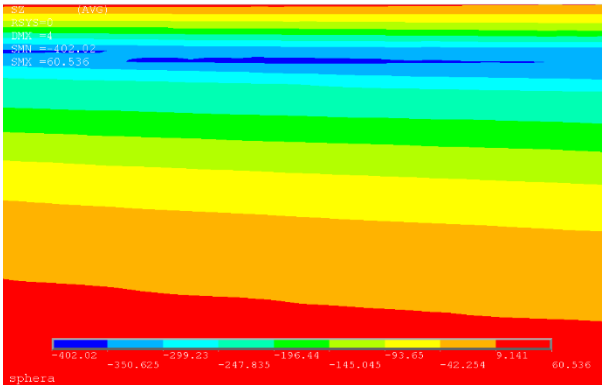


Рис. 3.44. Розподіл залишкових напружень σ_z у зразку

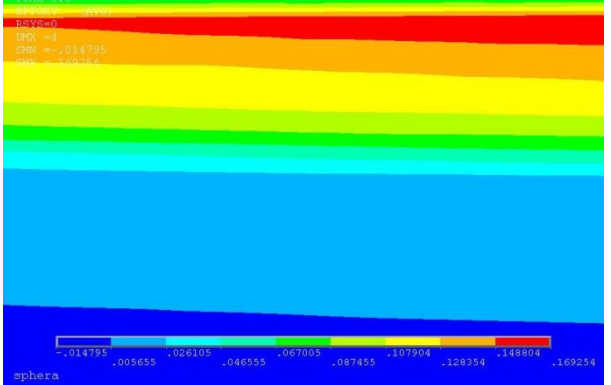


Рис. 3.45. Розподіл залишкових деформацій γ_{xy} у зразку

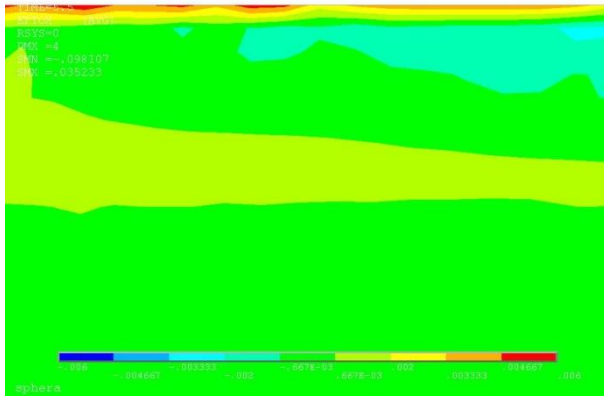


Рис. 3.46. Розподіл залишкових деформацій ϵ_x у зразку

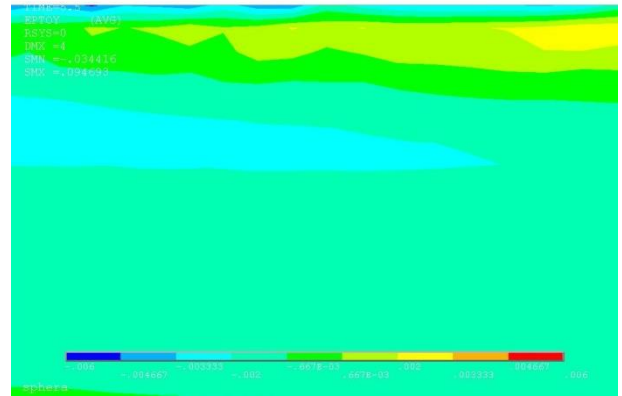


Рис. 3.47. Розподіл залишкових деформацій ϵ_y у зразку

Аналіз розподілення напружень у зоні деформації рис. 3.34–3.37 показує, що всі компоненти нормальних напружень σ_x , σ_y , σ_z є стискувальними, при цьому максимальне значення σ_y становить 1226 МПа в момент контактування поверхні деформівного елемента з деталлю. На рис. 3.38 напруження зсуву τ_{xy} у зоні контакту змінює знак під індентором на протилежний перед індентором. Їх величина залежить від коефіцієнта тертя між деталлю і деформівним елементом.

Деформація ϵ_x (рис. 3.39) є розтягувальною, а радіальна деформація ϵ_y – стискувальною (рис. 3.40).

Максимальна величина деформації досягається в момент контакту індентора з деталлю. З віддаленням від поверхні деталі значення напруження і деформацій зменшуються і наближаються до нуля (рис. 3.42–3.47).

Проведений скінченно-елементний аналіз дозволяє змодельовати складні процеси, які відбуваються під час контактної взаємодії деформівного інструмента та оброблюваної поверхні.

Застосовування розробленої моделі розрахунку для процесів поверхнево-пластичного деформування прогнозує властивості поверхневого шару оброблюваних матеріалів, підвищує фізико-механічні властивості й оптимізує технологічні режими процесу обробки.

На рис. 3.48 подано графік розподілу залишкових напружень у приповерхневому шарі.

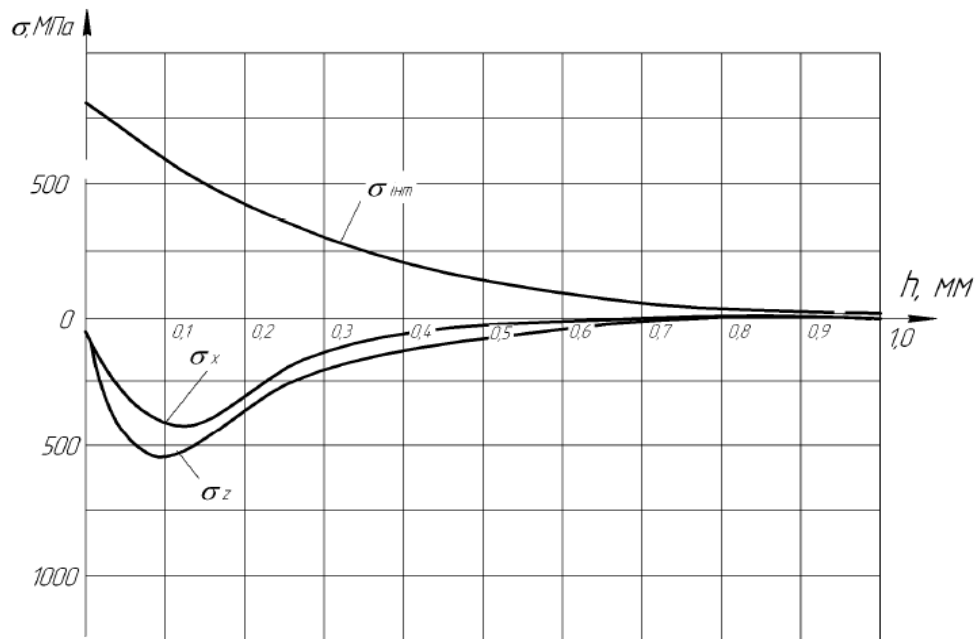


Рис. 3.48. Розподіл залишкових напружень у приповерхневому шарі

Залишкові напруження σ_x , σ_z на поверхні деталі є стискувальними (рис. 3.48). Максимальна величина стискувальних напружень становить 400...510 МПа і сягає глибини 0,09...0,13 мм.

Для моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару для зміцнення поверхні **ПРМР** використовували циліндричну деталь зі сталі 45. Під час розрахунку було задано такі механічні властивості:

- границя міцності під час розтягування $\sigma_B = 847,58$ МПа;
- границя текучості $\sigma_{0,2} = 540$ МПа.

Коефіцієнт тертя між інструментом і заготовкою задавали як $f_{тр} = 0,08$ мм, глибину впровадження сферичного індентора – як $h = 0,005$ мкм.

Щоб оцінити вплив поверхнево-пластичного деформування [8] на межу витривалості поверхні циліндричної деталі, використовували нормальні напруження σ_x , σ_y , σ_z , дотичне напруження τ_{xy} та інтенсивність напружень $\sigma_{інт}$ у зоні деформації під навантаженням та після зняття навантаження, що характеризує залишковий напружено-деформований стан.

На рис. 3.49–3.53 наочно показано розподіл напружень (σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , $\sigma_{інт}$) у зразку під навантаженням. Рис. 3.54–3.58 ілюструють розподіл деформацій (ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z , γ_{xy} , $\epsilon_{інт}$) у зразку під навантаженням. На рис. 3.59–3.61 унаочнено розподіл залишкових напружень (σ_x , σ_z , $\sigma_{інт}$) та розподіл залишкових деформацій (ϵ_z , $\epsilon_{інт}$) (рис. 3.62–3.63) після зняття навантаження.

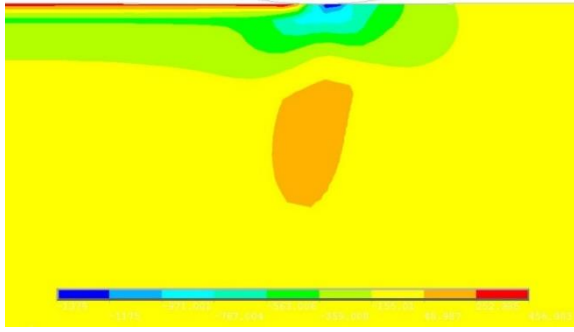


Рис. 3.49. Розподіл напружень σ_x у зразку під навантаженням

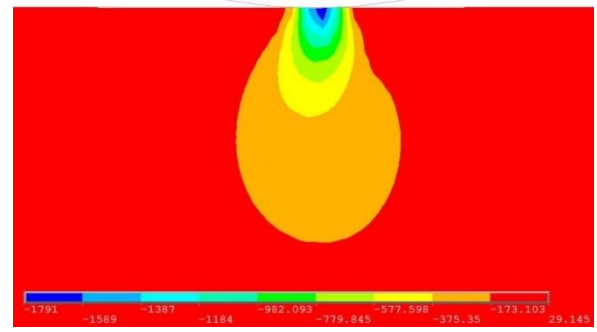


Рис. 3.50. Розподіл напружень σ_y у зразку під навантаженням

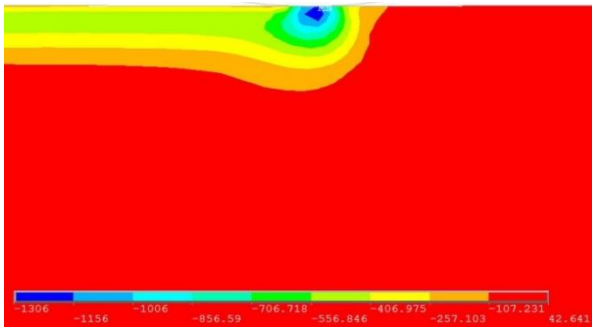


Рис. 3.51. Розподіл напружень σ_z у зразку під навантаженням

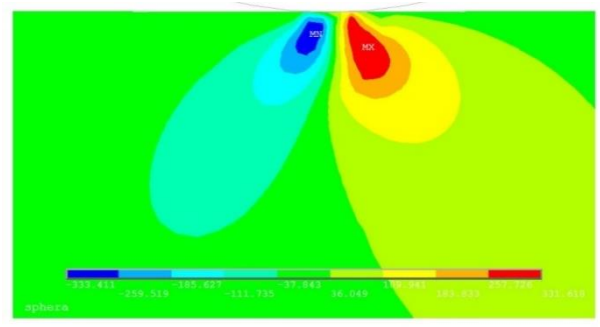


Рис. 3.52. Розподіл напружень τ_{xy} у зразку під навантаженням

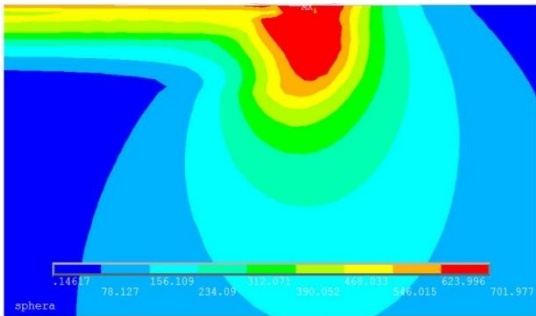


Рис. 3.53. Розподіл напружень σ_{int} у зразку під навантаженням

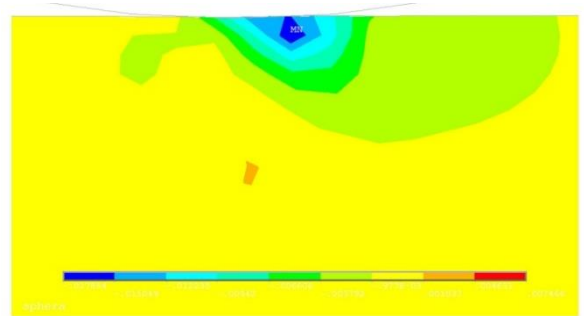


Рис. 3.54. Розподіл деформацій ϵ_x у зразку під навантаженням

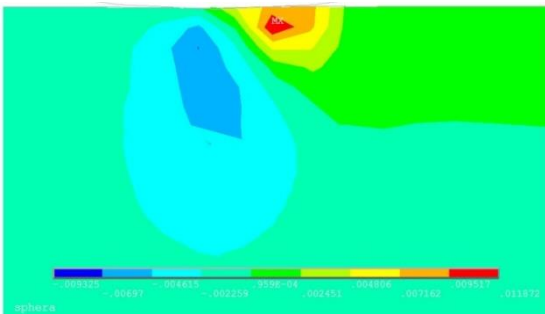


Рис. 3.55. Розподіл деформацій ϵ_y у зразку під навантаженням

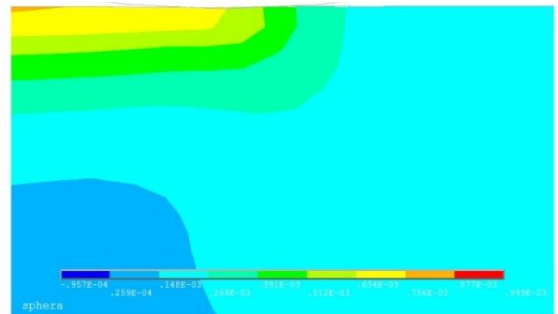


Рис. 3.56. Розподіл деформацій ϵ_z у зразку під навантаженням

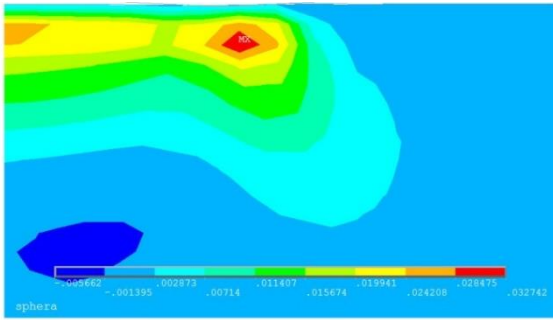


Рис. 3.57. Розподіл деформацій γ_{xy} у зразку під навантаженням

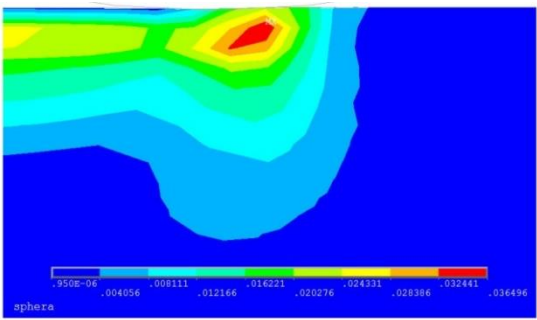


Рис. 3.58. Розподіл деформацій ϵ_{int} у зразку під навантаженням

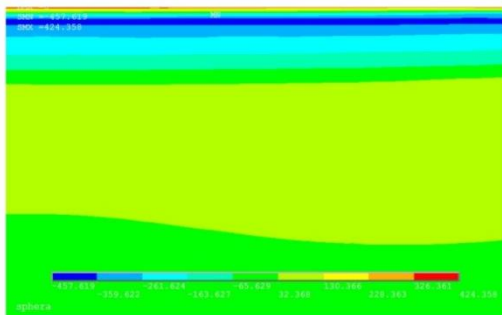


Рис. 3.59. Розподіл залишкових напружень σ_x у зразку після зняття навантаження

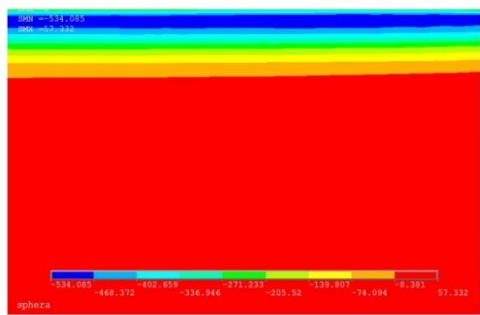


Рис. 3.60. Розподіл залишкових напружень σ_z у зразку після зняття навантаження

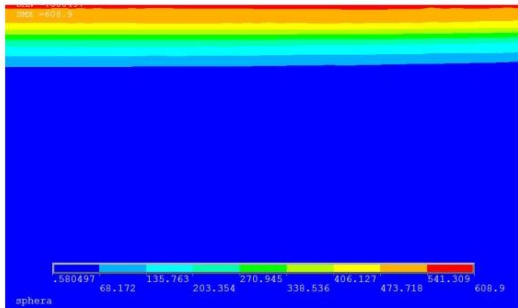


Рис. 3.61. Розподіл залишкових напружень σ_{int} у зразку після зняття навантаження

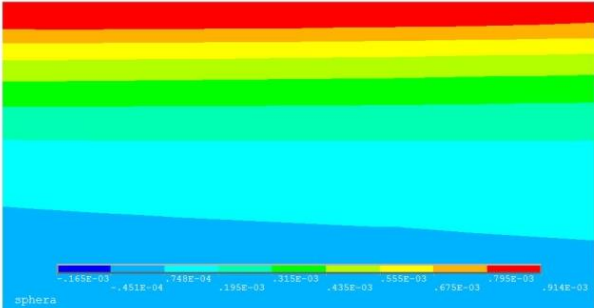


Рис. 3.62. Розподіл залишкових деформацій ϵ_z у зразку після зняття навантаження

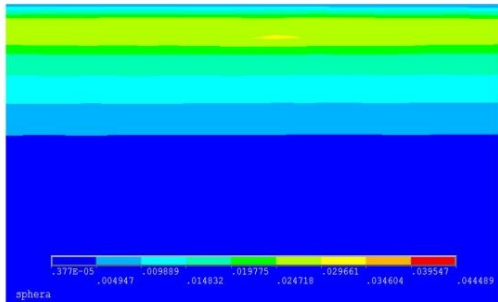


Рис. 3.63. Розподіл залишкових деформацій ϵ_{int} у зразку після зняття деформацій

Результати моделювання показали, що після зміцнення поверхневого шару деталі сферичним інструментом, який вдавлювали у поверхню із зусиллям $P = 550$ Н, напруження мають стискувальний характер: $\sigma_x = 1379$ МПа, $\sigma_z = 1306$ МПа, $\sigma_y = 1791$ МПа. Інтенсивність напружень зростає із вдавлюванням ідентора в циліндричну поверхню, $\sigma_{\text{ІНТ}} = 701,9$ МПа.

Величина зсуву τ_{xy} виникає в напрямку руху деформувального інструмента та змінює знак на протилежний перед ним у зоні контакту, що обумовлюється коефіцієнтом тертя між поверхнею циліндричної деталі та ідентором. Після зняття навантаження величини напруження і деформації зменшуються і наближаються до нуля (рис. 3.59–3.63).

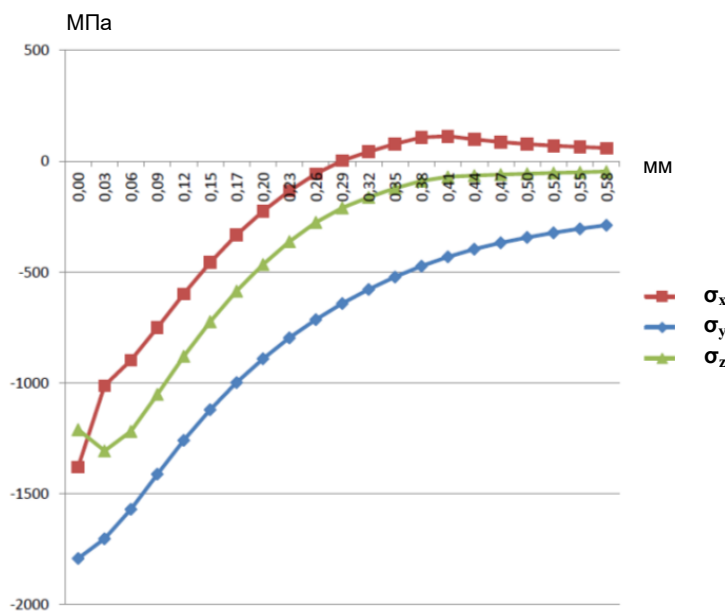


Рис. 3.64. Розподіл експериментальних значень діючих напружень на активній стадії навантаження

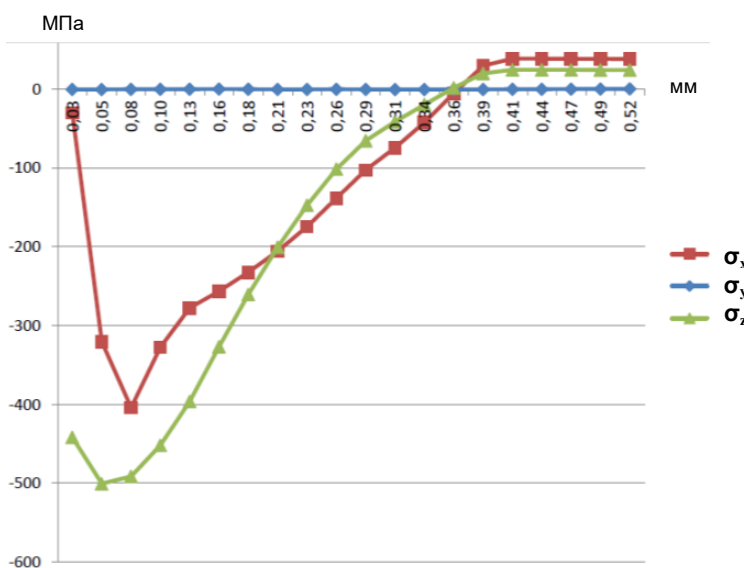


Рис. 3. 65. Розподіл експериментальних значень залишкових напружень після зняття навантаження

Розподіл експериментальних значень діючих напружень на активній стадії навантаження та після зняття навантаження зображено на рис. 3.64–3.65.

Аналіз розподілу діючих напружень (рис. 3.64) під час навантаження показує, що максимальна величина стискувальних напружень $\sigma_y = 1791$ МПа відповідає глибині 30...40 мкм, після зняття навантаження стискувальні напруження врівноважуються і дорівнюють нулю. Залишкові напруження у приповерхневому шарі на глибині 300...350 мкм (рис. 3.65) є стискувальними та переходять в розтягувальні залишкові напруження на глибині 350...400 мкм і становлять 40...50 МПа.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ОБРОБЛЕНИХ ПРИ КОМПЛЕКСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ОБРОБКИ

Якість – поняття багатогранне, яке включає в себе ряд аспектів: від зовнішнього вигляду (відповідність форми, точність розмірів, шорсткість, твердість та інші характеристики основного матеріалу) до експлуатаційних властивостей (зносостійкість, надійність, корозійна стійкість, контактна жорсткість тощо).

У машинобудуванні, у тому числі й поліграфічному, важливою проблемою є підвищення надійності машин і механізмів, їхньої економічної ефективності як у виробництві, так і в наступній експлуатації. Очевидно, що надійність машин і механізмів у разі правильної їх експлуатації залежить від якості деталей, з яких вони зібрані [94].

Постійне зростання вимог до якості і точності робочих поверхонь змушує скрупульозно досліджувати й використовувати технологічні можливості методів фінішної обробки та зміцнення. Зміцнення тонкого поверхневого шару масивної деталі є прогресивним напрямом у технології машинобудування, оскільки дає змогу зекономити дорогі леговані сталі та сплави [95].

Якісні показники деталей, такі як зносостійкість, контактна жорсткість, корозійна стійкість, міцність і якість поверхневого шару, формуються на етапі виготовлення, тому забезпечення високої працездатності механізмів доцільно починати з моменту виготовлення окремих їх складових частин, а не з введення в експлуатацію. Кожна експлуатаційна властивість, що виявляється за заданих умов, забезпечується певним діапазоном значень комплексу показників якості, наприклад, точністю геометричних розмірів, форми, взаємним розміщенням поверхонь, шорсткістю, мікротвердістю, залишковою напругою. Тому завдяки лише режимам експлуатації неможливо досягти таких результатів, як за комплексного підходу, що ґрунтується на дослідженні й удосконаленні методів виготовлення деталей і механізмів.

Експлуатаційні властивості деталей машин та їх з'єднань залежать від системи параметрів якості робочих поверхонь: геометричних параметрів (відхилення форми, хвилястість і шорсткість поверхні); фізико-механічних властивостей (поверхневі залишкові напруження, епюри їх розподілу, товщина зміцненого шару, його будова і фазовий склад, розмір зерна, щільність дефектів кристалічної будови, твердість, ступінь і глибина наклепу) [96].

Завдання підвищення якості поверхонь та поверхневих шарів, а також експлуатаційних властивостей циліндричних деталей поліграфічних машин є пріоритетним і на сьогодні.

4.1. Експериментальні дослідження мікрогеометрії поверхні

Підвищення якості поліграфічної продукції, охоплює численні завдання, які потрібно узгодити: проектування й виготовлення деталей та механізмів обладнання з технологіями поліграфічного виробництва. Одним із таких завдань є оцінювання впливу шорсткості, хвилястості та відхилення від форми поверхонь циліндричних деталей на їх функціональні властивості [97].

На практиці істотний вплив на термін служби окремих деталей поліграфічного обладнання справляють макрогеометричні відхилення деталей від правильної геометричної форми (конусність, еліпсність, бочкоподібність, корсетність циліндричної поверхні), хвилястість поверхні та її мікрогеометрія [52].

З-поміж геометричних параметрів найбільший вплив на точність обробки й експлуатаційні властивості деталей справляє мікрогеометрія (шорсткість) поверхні [98]. Вона обумовлена наявністю мікронерівностей, які є результатом взаємодії оброблюваної поверхні з деформівним інструментом.

Шорсткість поверхні – один з основних параметрів якості поверхні, який регулює ДСТУ 2413-94 «Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення» [99]. Вона є однією з найважливіших характеристик, що впливає на зносостійкість, контактну жорсткість, корозійну стійкість тощо. На шорсткість поверхні впливає багато технологічних чинників: режими обробки виготовлення друкарського циліндра, геометрія, матеріал і якість поверхні ідентора, структура матеріалу заготовки та його механічні властивості [100, 101].

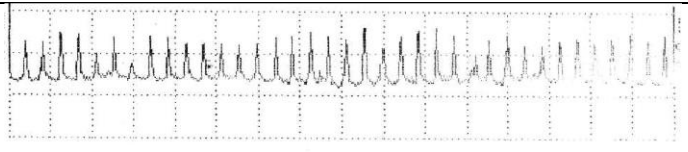
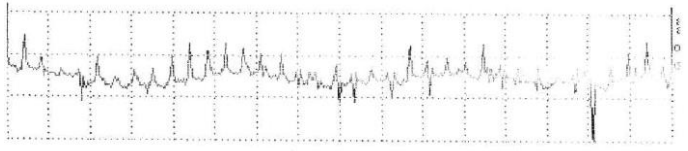
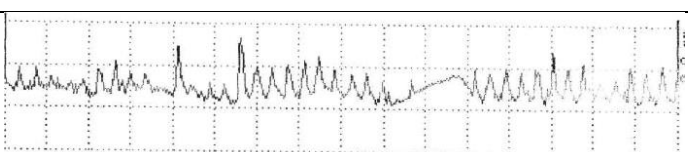
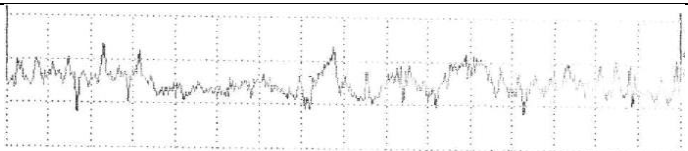
Дослідження з визначення шорсткості поверхні проводили за системою середньої лінії (система M), яка відповідає рекомендаціям ISO і врахована в ДСТУ «Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури [84]. Кількісно шорсткість оцінювали параметром R_a (середнє арифметичне відхилення профілю) та R_z (висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю) у межах базової довжини).

Дослідження мікрогеометрії поверхні під час нанесення **частково-регулярного мікрорельєфу** проводили на зразках, виготовлених зі сталі 45.

Профілограми з поверхні деталей за горизонтального збільшення $\Gamma_{зб} = 40$, вертикального збільшення $B_{зб} = 2000$ і середнє арифметичне відхилення профілю R_a з використанням зазначених вище методів обробки наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Середнє арифметичне відхилення профілю та профілограми для сталі 45
за різними технологіями

№ з/п	Метод обробки	Середнє арифметичне відхилення профілю, R_a	Профілограми
1	Шліфування	0,16...3,2	
2	Хромування	0,32...2,5	
3	Вібраційне накатування	0,32...2,5	
4	Вібраційне накатування + хромування	0,16...1,6	

Геометричні параметри поверхні після вібраційного накатування алмазним індентором майже не відрізнялись від геометричних параметрів поверхні після шліфування. Шорсткість поверхні після комплексної технології $R_a = 0,16...1,6$ мкм.

Дослідження мікрогеометрії поверхні після нанесення **повністю регулярного мікрорельєфу** проводили на зразках сталі 45.

На рис. 4.1–4.3 подано профілограми поверхонь без застосування комплексного технологічного процесу, після вібраційного накатування, із застосуванням комплексної технології, до якої входять вібраційне накатування та хромування.

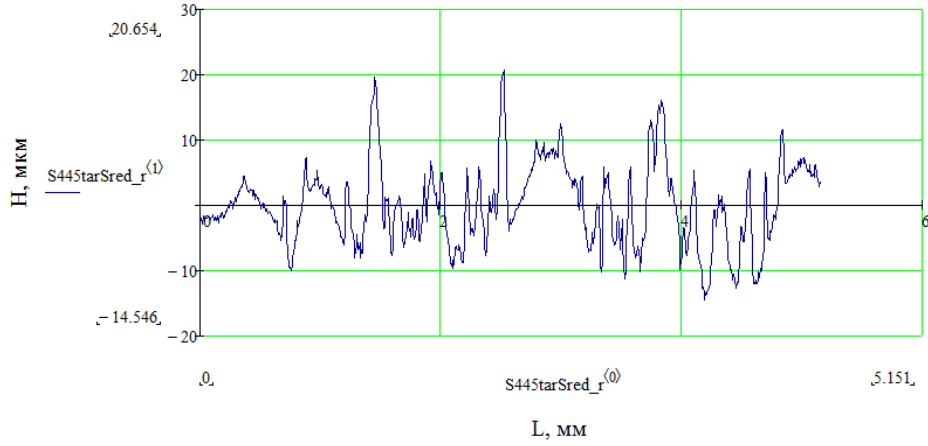


Рис. 4.1. Профілограма поверхні циліндричної деталі

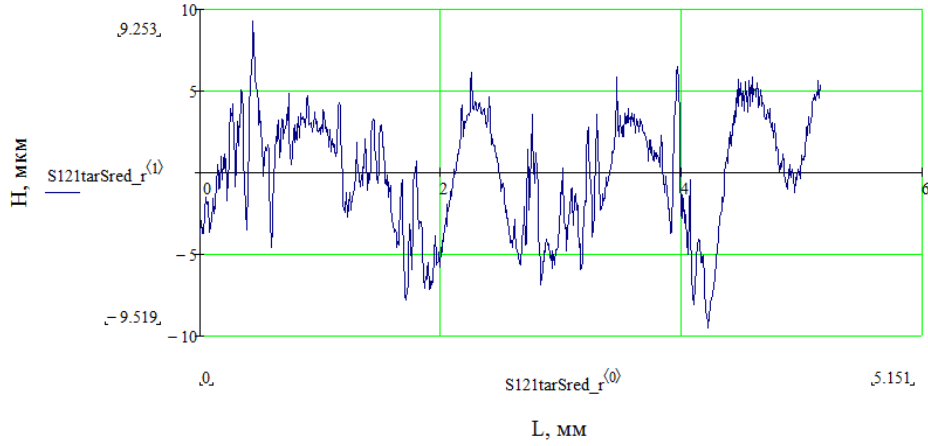
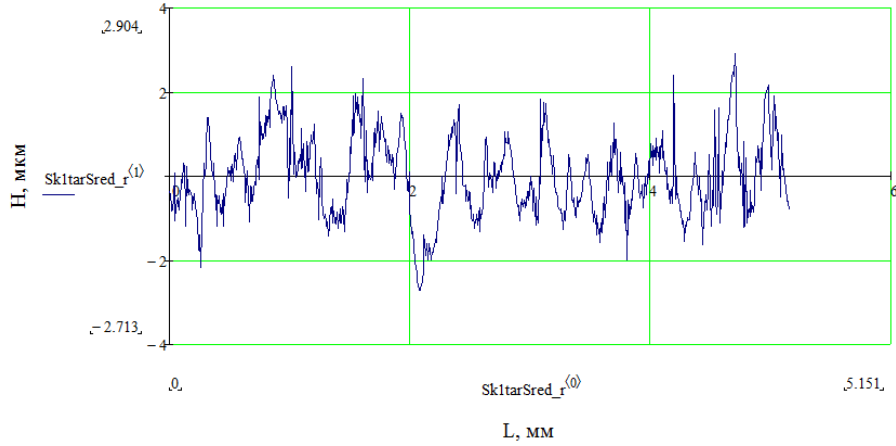
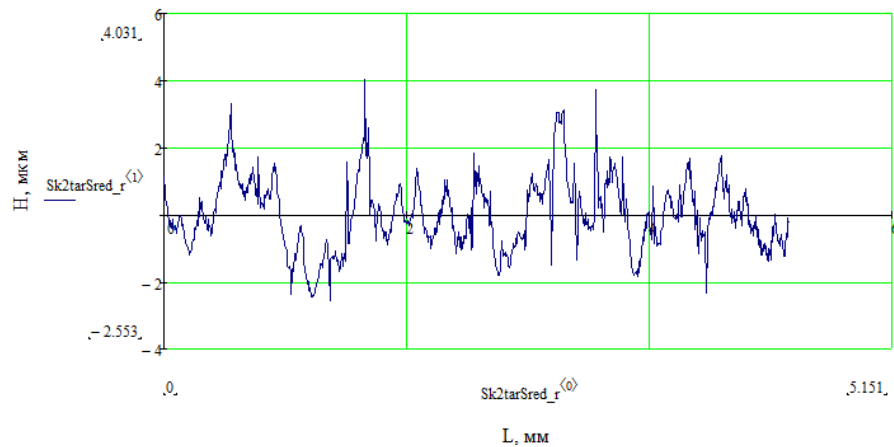


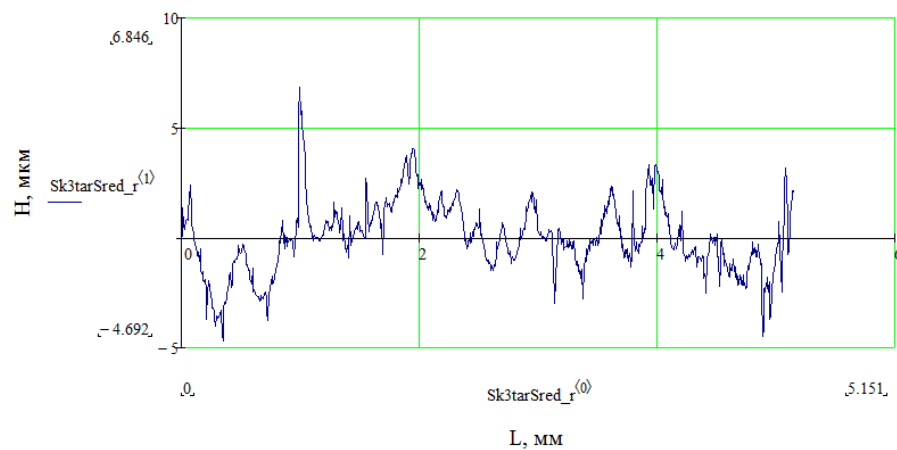
Рис. 4.2. Профілограма поверхні циліндричної деталі після
вібраційного накатування



а) за $P = 300 \text{ Н}$, $R = 3 \text{ мм}$;



б) за $P = 550$ Н, $R = 2$ мм;



в) при $P = 450$ Н, $R = 2,5$ мм.

Рис. 4.3. Профілограми поверхні циліндричної деталі після комплексного технологічного процесу

Після проведення експериментів та оброблення результатів у програмі Mathcad15 було отримано результати, які занесено в табл. 4.2.

№ з/п	Матеріал зразка і метод оброблення поверхні	Середнє арифметичне відхилення профілю R_a	Висота нерівностей профілю по десяти точках R_z
1	Зразок сталь 45	4,83	27,89
2	Зразок сталь 45 після вібраційного накатування	2,88	16,48
3	Зразок сталь 45 після комплексного технологічного процесу, $P = 550$ Н, $R = 2$ мм	0,63	5,22
4	Зразок сталь 45 після комплексного технологічного процесу,	1,98	

	$P = 300 \text{ Н}, R = 3 \text{ мм}$		
5	Зразок сталь 45 після комплексного технологічного процесу, $P = 450 \text{ Н}, R = 2,5 \text{ мм}$	1,21	10,14

Порівняння шорсткості поверхні зразків без нанесення мікрорельєфу й після застосування комплексної технології з утвореним повністю регулярного мікрорельєфу гексагональної форми та хромування свідчить про зменшення шорсткості поверхні, що пояснюється підвищенням плавності та регулярністю висот. Зменшення висоти мікронерівностей приводить до збільшення відносної опорної площі за рахунок збільшення радіуса заокруглення впадин між нерівностями та до збільшення опору корозійної стійкості, зносостійкості й підвищення інших експлуатаційних характеристик. Отже, для підвищення вказаних вище властивостей деталей поліграфічних машин ефективним є застосування комплексного технологічного процесу.

4.2. Експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик поверхні

У процесі експлуатації поверхневі шари деталей поліграфічних машин, які працюють в умовах тертя, піддаються корозійному, тепловому, адгезійному впливам, при цьому важливу роль відіграє структура й фізико-механічний комплекс властивостей тонкого приповерхневого шару матеріалу, від якого істотно залежить характер утворених структур за умов тертя, а також кінетика зношування.

Умови випробовувань істотно впливають на отримані результати, тому слід було задати ці умови коректно, щоб параметри фізико-механічних властивостей можна було порівняти та відтворювати їх надалі.

Дослідження фізико-механічних властивостей поверхонь деталей поліграфічного обладнання обумовлено їх удосконаленням й технічним розвитком. Прикладна проблема визначається, передусім, завданнями деформування металів у приповерхневих шарах. Для оптимізації процесів обробки зміцнення деталей треба вивчати закономірності формування фізико-механічних властивостей [43].

Якість поверхневого шару деталей машин охоплює як геометричні характеристики, так і фізико-механічні властивості.

Поряд з тим, дослідження інших науковців [102, 103, 43] свідчать, що істотний вплив на експлуатаційні властивості деталей машин: міцність, зносостійкість, втомну міцність тощо мають фізико-механічні параметри якості поверхні [104].

На сьогодні технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару друкарського циліндра (твердість, глибина зміцненого шару, ступінь нагартування, залишкові напруження) досліджено недостатньо.

Одним з найважливіших параметрів якості, який контролюють під час виготовлення деталі, є твердість поверхневого шару. Вимірювання твердості здійснювали на твердомірі Брінелля ТШ-2М (рис. 4.4) за ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю» [105], в якому сталева кулька діаметром D вдавлюється в досліджуваний зразок під навантаженням P з витримуванням 10, 30 або 60 с.

Число твердості за Брінеллем розраховують як відношення навантаження P , що діє на кульку, до площі F кулькової поверхні відбитка (рис. 4.4):

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (4.1)$$

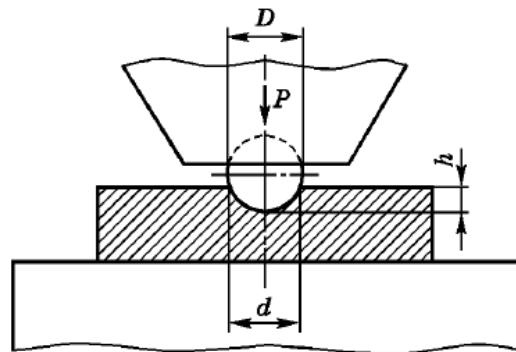


Рис. 4.4. Схема визначення твердості металів на твердомірі Брінелля

Площа кулькового сегмента відбитка:

$$F = \pi Dh. \quad (4.2)$$

Глибину відбитка h виражають через діаметри кульки D і відбитка d :

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}. \quad (4.3)$$

Ми не користувалися розрахунками, а послуговувалися таблицями за ГОСТ 9012-59 [105], визначаючи значення HB залежно від діаметра відбитка й обраного навантаження. Чим менший діаметр відбитка, тим вища твердість.

Під час вимірювання твердості за методом Брінелля було враховано такі умови:

– поверхня зразка була плоскою, гладкою і вільною від окисної плівки;

- шорсткість поверхні зразка – не більше $R_a = 2,5$. Обробку поверхні зразка проводили шліфуванням або використовували дрібний напилік. Для визначення твердості кулькою діаметром 1 мм поверхню зразка полірували;
- товщина зразка була не меншою, ніж у 8 разів, за глибину відбитка, а на зворотному боці зразка не було слідів деформації після випробування;
- зразок було підготовлено так, щоб у результаті механічної або іншої обробки (нагрівання, наклеп) не змінювалися властивості металу;
- відстань між центром відбитка і краєм зразка була не меншою, ніж 2,5 діаметра відбитка d ; відстань між центрами двох суміжних відбитків – не менш як 4 діаметри відбитка;
- діаметри відбитків вимірювали у двох взаємно перпендикулярних напрямках. За діаметр відбитка d брали середнє арифметичне значення результатів вимірювання;
- діаметр кульки D і відповідне зусилля P обирали так, щоб діаметр відбитка був у межах $(0,24 \dots 0,6) D$ [50].

Випробування твердості за Віккерсом (ДСТУ 6507-2-2008 «Металеві матеріали. Визначення твердості за Віккерсом») [106]) застосовують для вимірювання мікротвердості металів, він є одним з найбільш досконалих і поширених у лабораторній практиці. Цінність методу полягає у тому, що внаслідок малих навантажень вдавлення вдається визначати мікротвердість поверхневих шарів.

Реалізація методу відбувається таким чином: алмазну чотиригранну пірамідку з кутом при вершині $\alpha = 136^\circ$ під дією сили, прикладеної протягом певного часу, вдавлюють у поверхню зразка. Після зняття навантаження вимірюють довжину обох діагоналей відбитка. Залежно від твердості і товщини металу застосовують навантаження 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 кгс. Поверхня зразка має бути відполірована.

Твердість за Віккерсом вказують в одиницях HV (Hardness Vickers) і визначають як частку від ділення навантаження F , кгс, прикладеного до пірамідки, на площу поверхні відбитка A мм² за формулою

$$H_\mu = 1,8544 \frac{F}{d^2}, \quad (4.4)$$

де d – середнє арифметичне значення довжин обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм;

F – навантаження на індентор (точність визначення маси гирі вагою 50 г становить $\pm 0,1$ мг), кг.

Діагоналі вимірюють за допомогою мікроскопа. Число твердості знаходять за спеціальними таблицями.

До основних фізико-механічних властивостей металів належать механічні (границя міцності, границя текучості) і пластичні (відносне подовження, відносне звуження) характеристики.

Для проведення досліджень було виготовлено стандартні зразки відповідно до ДСТУ 3668-97 «Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Визначення уявної твердості матеріалів в основному з рівномірною твердістю у перерізі» [107], ДСТУ 3669-97 «Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Метод випробування на згинання ударом» [108], а також створено умови, найбільш наближені до реальних. Для проведення випробувань застосовували розривну машину МР-500. Зразки розміром 5×10×55 мм для випробування на міцність піддавали ламанню. Границю міцності визначали за формулою

$$\sigma_b = \frac{F_m}{S_0}, \quad (4.5)$$

де F_m – максимальне зусилля, прикладене до зразка;

S_0 – значення площі до моменту подовження.

Під час проведення випробування на шкалі розривної машини фіксували навантаження, яке відповідає межі плинності, і максимальне навантаження. Випробування проводили до розриву зразка.

Після проведення досліду, розривну машину зупиняють і вимірюванням діаметра зразка, кінцевої та початкової довжини зразка, площі перерізу на початку та в місці шийки визначають відносне подовження [32]

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100 \% \quad (4.6)$$

та відносне звуження

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100 \%, \quad (4.7)$$

де l_x , l_0 – кінцева та початкова довжина зразка;

F_0 , F_x – початкова площа перерізу зразка та кінцева в місці шийки.

Дослідження фізико-механічних властивостей було виконано на трьох групах зразків: після вібраційної обробки, комплексної технології, гальванічного хромування.

У роботі наведено результати випробування фізико-механічних властивостей матеріалів, з яких виготовлено деталі поліграфічного обладнання, що працюють за умови тертя (табл. 4.3).

Як видно з табл. 4.3, вібраційне накатування **з нанесенням частково-регулярного мікрорельєфу** з наступним хромуванням дозволило одержати найвищі значення механічних властивостей порівняно з хромуванням і вібраційним накатуванням.

Якщо використовувати запропонований розроблений комплексний технологічний процес, поверхня деталі зміцнюється. Про це свідчить зміна мікротвердості приповерхневого шару, яка має найбільший вплив на експлуатаційні властивості робочих поверхонь циліндричних деталі.

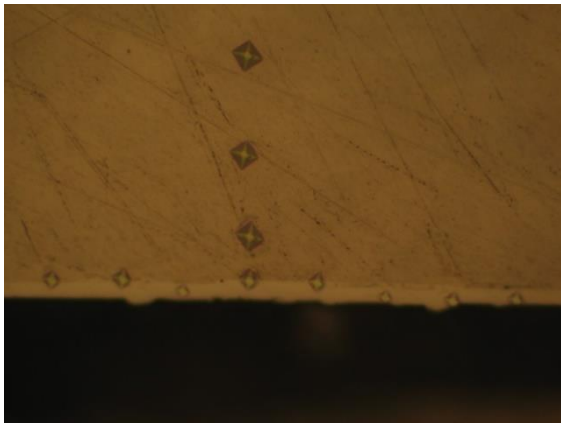
Дослідження мікротвердості зразків показано на рис. 4.6 – 4.8.

Таблиця 4.3

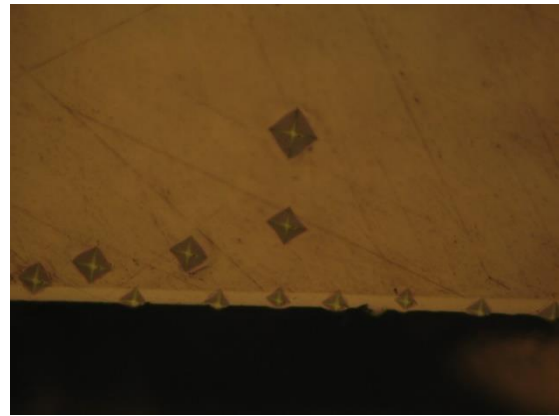
Матеріали та їхні фізико-механічні властивості

№ з/п	Матеріал	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Границя міцності при розтягуванні σ_B , МПа	Відносне подовження δ , %	Мікротвердість H_{xp} , МПа	Мікротвердість H_{Bo} , МПа	Мікротвердість $H_{Bo+Xш}$, МПа	Коефіцієнт зміцнення $K_{зм}$
1	У10				8240...9110	6940...7680	9250...10300	4,2
3	Сталь 40	512	826	19	5230...5960	4740...5340	6250...7110	4,6
4	Сталь 45	560	830	16	6680...7230	5420...5870	8410...9460	4
5	Сталь 20Х	650	800	11	5790...6820	4350...4740	7960...9640	4,9
6	Сталь 20Х	800	1000	10	8010...9270	7740...8450	10140...11960	5
7	ХГС	650	1080	22	8840...9990	8030...8870	10980...11130	4,86
8	18ХГТ	900	1000	9	8130...9280	7740...8870	10760...11890	4,8
9	38ХМЮА	850	1100	14	8860...9650	7740...8870	9600...11000	4,9

Примітка: H_{xp} – мікротвердість поверхні після хромування; H_{Bo} – мікротвердість поверхні після вібраційного обкатування; $H_{Bo+Xш}$ – мікротвердість поверхні після вібраційного обкатування з наступним хромуванням.



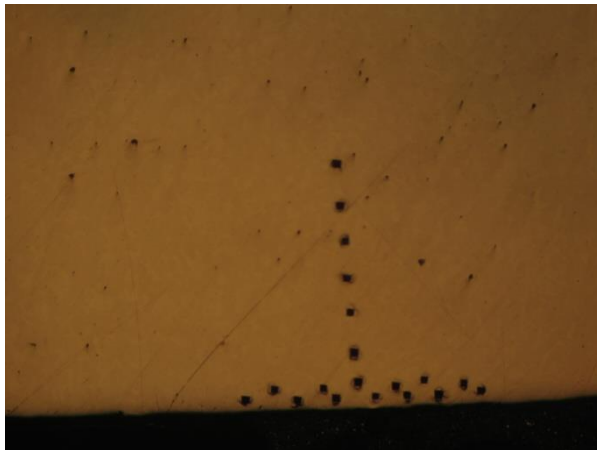
а



б

Рис. 4.6. Мікротвердість зразків зі сталі 45 після хромування:

а – за навантаження 20 г, $\times 500$; б – за навантаження 50 г, $\times 500$



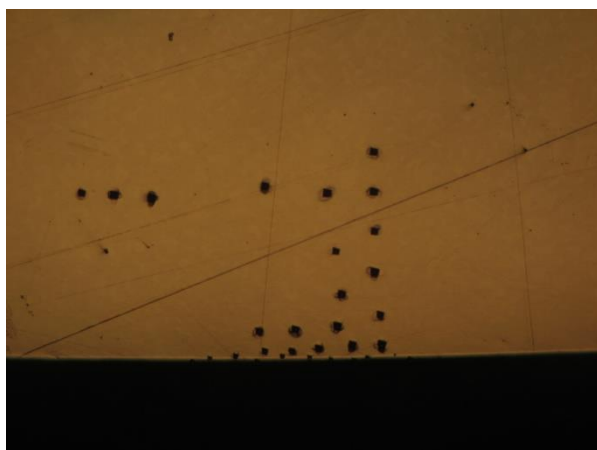
а



б

Рис. 4.7. Мікротвердість зразків зі сталі 45 після вібраційного обкатування

за навантаження 50 г: а – $\times 100$; б – $\times 500$



а



б

Рис. 4.8. Мікротвердість зразків зі сталі 45 після комплексної технології

за навантаження 50 г: а – $\times 100$; б – $\times 500$

Під час дослідження зразків, зокрема зі сталі 45, після застосування комплексної технології (рис. 4.8) виявлено, що для глибини зміцненого шару сталі 45, яка складає 16,5 мкм, мікротвердість була в межах 8410...9460 МПа. Це дозволяє зробити висновок, що таке поверхнєве зміцнення збільшило мікротвердість поверхні у 4...4,5 рази порівняно з основним металом і в 1,5 рази у порівнянні із суто хромованою поверхнею.

Експериментальні дослідження, результати яких наведено на рис. 4.8 та у табл. 4.3, свідчать про ефективність комплексної технології, що дозволяє отримати високі параметри фізико-механічних характеристик, а відтак, забезпечити їхні високі експлуатаційні властивості під час виготовлення та відновлення циліндричних деталей поліграфічних машин.

Нанесення **повністю регулярного мікрорельєфу** вібраційним накатуванням було здійснено на стандартних зразках. Було визначено фізико-механічні характеристики: випробування твердості за Бринелем (HV), випробування на міцність при вигинанні (границя міцності) (σ_B), границю плинності (σ_T), відносне подовження (δ) та відносне звуження (ψ) відповідно до методик (ГОСТ 18227-98 «Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Образцы для испытания на растяжение»; ГОСТ 25698-98 «Материалы металлические спеченные, кроме твердых сплавов. Определение кажущейся твердости материалов в основном с равномерной твердостью по сечению» [32, 37]. Як матеріал для зразків обрано сталь 45, з якої виготовлено друкарські циліндри різних фірм виробників.

Порівняльні дані міцнісних властивостей матеріалу циліндричних зразків до нанесення мікрорельєфу та хромування і після утворення регулярного мікрорельєфу та гальванічного хромування наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Результати фізико-механічних випробувань матеріалу друкарського циліндра

№ зразка	HV , МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
Поверхня з мікрорельєфом гексагонального типу					
1	2270	683	341	14,6	33
2	2290	680	374	13,8	27
3	2290	683	410	13,6	26

Результати мікротвердості поверхні друкарського циліндра після застосування комплексного технологічного процесу наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Результати мікротвердості поверхні друкарського циліндра після застосування комплексного технологічного процесу

№ зразка	<i>HV</i> , МПа	<i>HB</i> , МПа (оцінюване)
1	8640	≈ 6720
2	8600	≈ 6560
3	8630	≈ 6490

Як видно з табл. 4.4, фізико-механічні характеристики поверхневого шару (твердість) циліндричної деталі без додаткової обробки нижчі за аналогічні показники після комплексного технологічного процесу. Це, насамперед, пов'язано з нанесенням хрому на розвинуту поверхню, яка утворена методом вібраційного накатування з формуванням регулярного мікрорельєфу гексагонального типу, ввігнутої форми, що зумовлює міцність зчеплення анодів хрому з поверхнею за рахунок сітчастої форми, знижує абразивні явища та підвищує корозійну стійкість. Висока пластичність сталі у поєднанні зі значною твердістю поверхні забезпечує високі експлуатаційні властивості друкарського циліндра у важких умовах роботи (високі швидкості обертання, навантаження та агресивне середовище).

Отримані результати свідчать про збільшення поверхневого зміцнення у 1,2...1,6 разів порівняно з твердістю основного металу та у 2,7...3,3 разів порівняно із хромованою поверхнею. Величина відносного видовження менша за відносне звуження майже вдвічі, що свідчить про анізотропні властивості матеріалу, які треба враховувати під час застосування комплексного технологічного процесу.

Проведені фізико-механічні дослідження, за яких отримано позитивні результати, підтверджують доцільність та ефективність застосування комплексного технологічного процесу, до якого входять метод вібраційного накатування і хромування.

4.3. Експериментальні дослідження структури поверхневого шару

Фізико-механічні властивості поверхневого шару характеризуються певною текстурою – орієнтацією деформованих зерен, зміною їхньої форми і розмірів, цілісністю матеріалу поверхневого шару, наявністю в ньому макро- і мікротріщин, структурними перетвореннями тощо.

Для встановлення якості металу як конструкційної речовини та визначення його впливу на фізико-механічні властивості деталей було проведено металографічний аналіз.

Дослідження відбувалося за допомогою фотомікроскопа відбитого світла Neophot-32 (фірма Карл Цейс, м. Єна, Німеччина) зі збільшенням до $\times 1000$ і методів оптичної металографії.

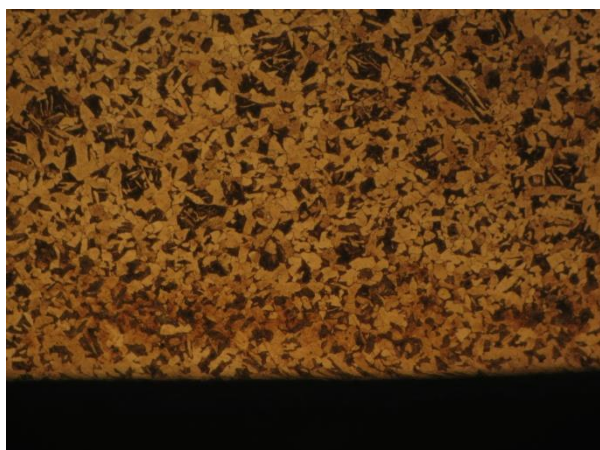
Зі зразків циліндричних деталей було виокремлено шліфи для дослідження структури. Потім вони проходили процес шліфування із застосуванням дрібнозернистих абразивів (використовували порошки М20, М14 зернистістю від 500 до 2500), після чого зразки полірували. На поверхню полірувального круга наносили шар пасти ДОІ, яка складається із дрібних частинок ($7...1$ мікрон) окису хрому (зеленого), силікагелю, стеаринової й олеїнової кислот, гідрокарбонату натрію і гасу. Після механічної обробки шліфи піддавали хімічній обробці. Для травлення поверхні використовували 5-процентний розчин азотної кислоти у 96-процентному етиловому спирті.

Товщину хромованої поверхні шліфів поперечного розрізу було визначено із застосуванням методу металографії. Шліфи виготовляли й готували згідно з ГОСТ 9.302-88 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля». Проводили п'ять замірів на відрізу 5 мм. Під час дослідження шару хрому завтовшки до 20 мкм застосовували мікроскоп зі збільшенням, яке відповідало 500...1000-крат, за товщини від 20 до 100 мкм – 400...500-крат, за товщини понад 100 мкм – 100...200-крат. Відносна похибка методу $\pm 0,8$ мкм для покриття завтовшки до 25 мкм і ± 10 % для покриття завтовшки понад 25 мкм.

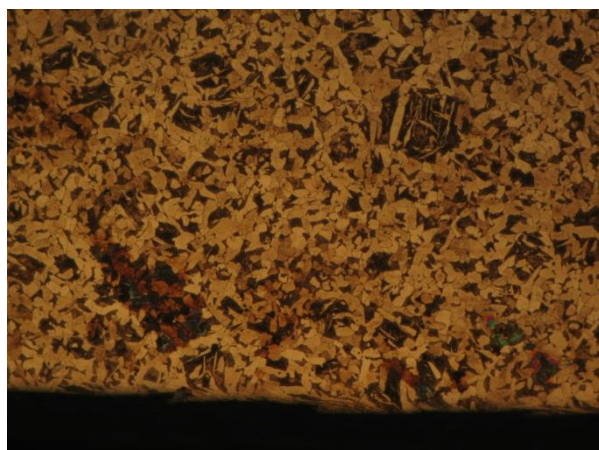
Експерименти з визначення впливу після нанесення **частково-регулярного мікрорельєфу** із хромуванням на поверхневе зміцнення деталей поліграфічних машин було проведено для порівняння з трьома групами зразків:

- 1) зразки після вібраційної обробки;
- 2) зразки після комплексної технології;
- 3) зразки після гальванічного хромування.

Загальний вигляд структури показано на рис. 4.9 – 4.12.



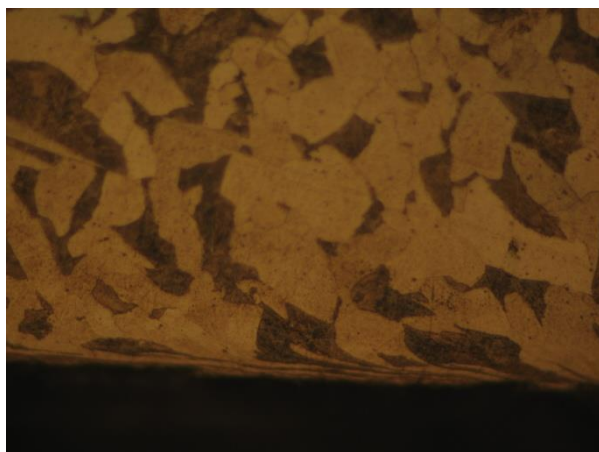
а



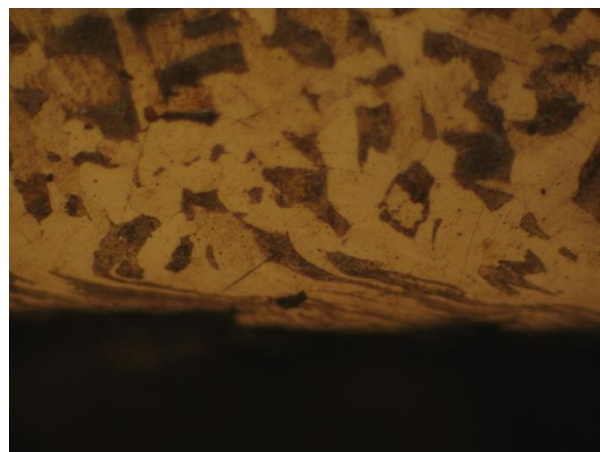
б

Рис. 4.9. Зразок зі сталі 45 після вібраційного обкатування з:

а – $S_k = 15$ мм; б – $S_k = 35$ мм ($\times 100$)



а



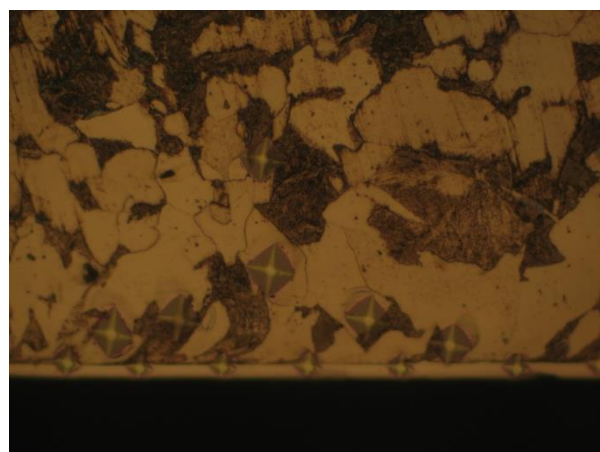
б

Рис. 4.10. Зразок зі сталі 45 після вібраційного обкатування з:

а – $S_k = 15$ мм; б – $S_k = 35$ мм ($\times 500$)



а



б

Рис. 4.11. Зразок зі сталі 45 після хромування:

а – $\times 100$, б – $\times 500$ з відбитками твердості

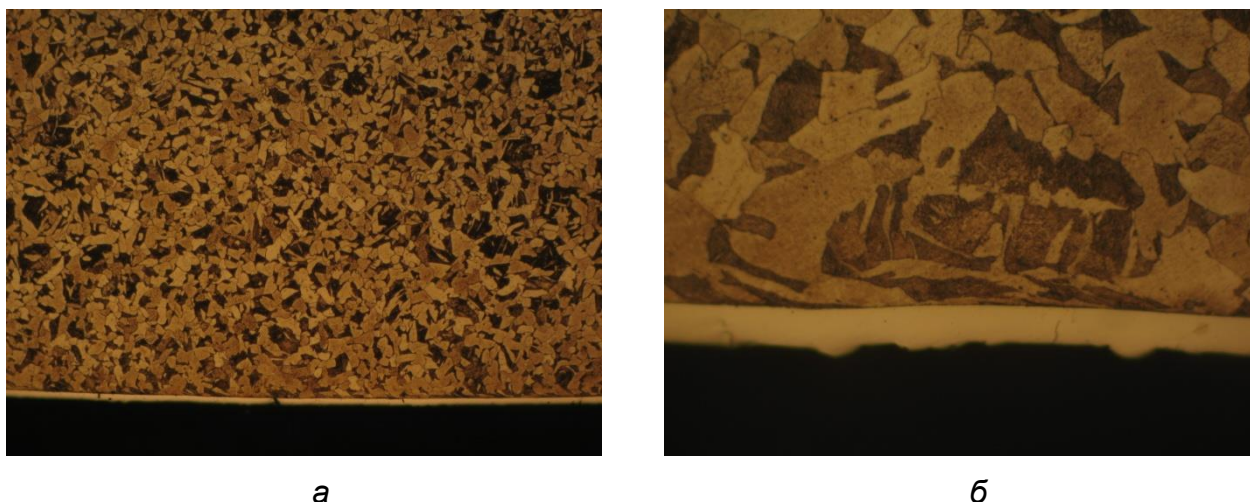


Рис. 4.12. Зразок зі сталі 45 після комплексної технології:
а – $\times 100$, б – $\times 500$

Структура металу, як видно з рис. 4.9–4.12, є ферито-перлітною, що характерно для якісної конструкційної сталі 45, і має чітко виражений поверхнево-текстурований шар.

Структура металу після комплексної технології на мікрофотографії (рис. 4.9) ілюструє щільне прилягання шару хрому до поверхні деталі після вібраційного накатування, яке сприяє не тільки інтегральному зміцненню поверхні (разом із гальванічним покриттям), а й міцності зчеплення покриття з деталлю.

Металографічний аналіз травлених шліфів показав, що в поверхневому шарі після пластичного деформування маємо зони дрібнення кристалічної структури вихідного зерна (рис. 4.9, 4.10 та 4.12). Малі пружнопластичні деформації поширюються у глибину матеріалу. Деформації навіть дуже малої величини викликають зміни механічних властивостей матеріалу поверхневого шару навіть без зміни якісного складу структури, що являє собою ферито-перлітну структуру, а текстурованість поверхневих шарів, яка виникає під дією деформації, забезпечує зростання фізико-механічних властивостей поверхні за рахунок внутрішньозернового дислокаційного зміцнення.

У результаті пластичної деформації поверхневого шару його властивості змінюються, метал стає міцнішим, твердість його збільшується. Такі зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару мають значний вплив на зносостійкість і динамічну міцність циліндричних деталей поліграфічного обладнання.

Металографічний аналіз застосовували також для шліфів, виготовлених зі зразків, які пройшли обробку вібраційним накатуванням з утворенням **повністю**

регулярного мікрорельєфу гексагонального типу ввігнутої форми й наступним хромуванням для визначення товщини хрому.

Для проведення експериментальних досліджень використовували друкарський циліндр і зразки зі сталі 45 – саме високодисперсна сорбітна структура сталі 45 зумовлює високу пластичність, підвищення в'язкості та опір ударному навантаженню.

Структуру друкарського циліндра після загартування і високого відпуску показано на рис. 4.13.

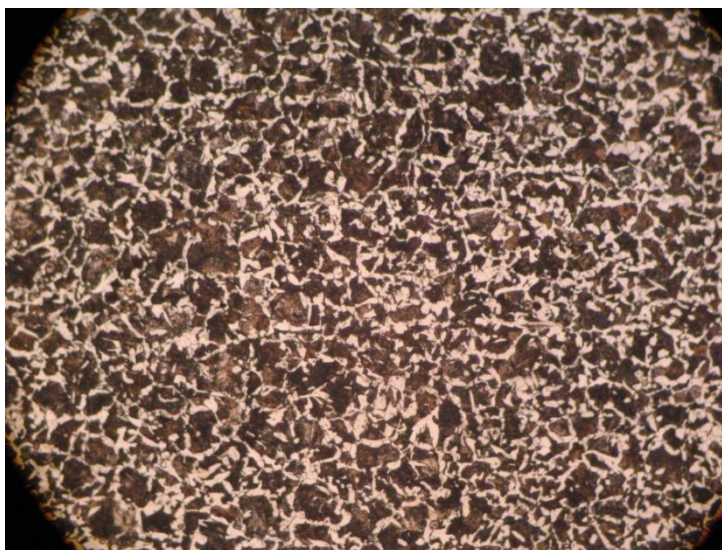


Рис. 4.13. Зразок друкарського циліндра аркушевої машини ($\times 100$)

Від структури металу, з якого виготовлено друкарський циліндр, залежать експлуатаційні характеристики і зносостійкість [28]. Отже, дослідження структури металу друкарського циліндра проводили з метою глибшого вивчення особливостей структуроутворення і триботехнічних властивостей.

Металографічний аналіз (рис. 4.13) показав, що для виготовлення друкарського циліндра аркушевих офсетних машин застосовують сталь 45 (ГОСТ 1050-88) «Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия» [54], яка являє собою сорбіт – ферито-цементитну суміш із зернистою формою карбідної фази (Fe_3C) з розміром зерна в межах 0,05...0,1 мкм. Щоб підвищити міцність, твердість та знизити пластичність сталь 45 піддавали термічній обробці, а саме гартуванню за температури 830...850 °С (середовище охолодження – вода) та для одержання механічних властивостей, що відповідають вимогам технічної документації, проводили високий відпуск (поліпшення), який включав нагрівання загартованої сталі до 500...650 °С (час витримки – 1 год), що забезпечило отримання зернистої структури сорбіту відпуску з високим комплексом властивостей.

Оскільки, саме робоча поверхня циліндра є відповідальною за якість поліграфічної продукції й сталий перебіг друкарського процесу, підвищенню її зносостійкості й довговічності приділялась особлива увага. З цією метою запропоновано комплексний технологічний процес, до якого входять на першому етапі метод вібраційного накатування, що утворює мікрорельєф гексагонального типу й дає можливість отримати розвинену поверхню з підвищеним опором крихкому зламу, меншою схильністю до старіння матеріалу, високою пластичністю матеріалу. А на другому етапі після утворення мікрорельєфу накладання на нього шару Cr. Доцільність нанесення хромового покриття зумовлена роботою друкарського циліндра в агресивному середовищі (фарба, ЗР, підвищені навантаження, високі швидкості обертання), а отже – і наявністю корозійних, кавітаційно-ерозійних та теплових процесів, що відбуваються на поверхні [109]. Міцність зчеплення електроосадженого хрому залежить від параметрів якості стану поверхні циліндра. Отримана розвинена поверхня дозволяє підвищити міцність зчеплення хрому, що підвищує антикорозійні властивості, твердість та конструкційну міцність друкарського циліндра.

На рис. 4.14 показано металографічну структуру циліндра з утвореним мікрорельєфом та з наступним хромуванням.

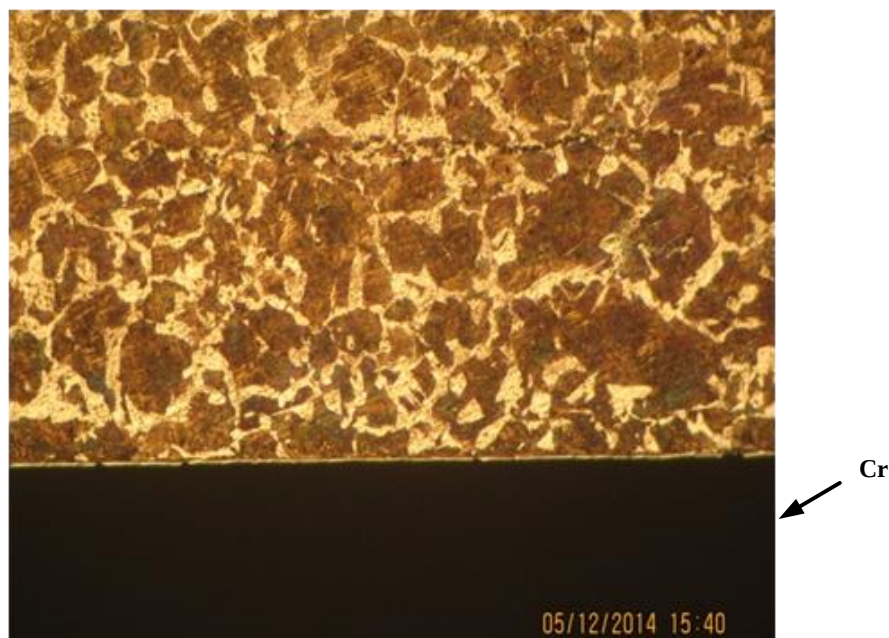


Рис. 4.14. Зразок зі сталі 45 після нанесення мікрорельєфу та хромування (×100)

Товщину нанесення хрому на робочу поверхню обирали на основі експериментальних досліджень зносостійкості та визначення фізико-механічних

характеристик. Встановлено, що найвищих показників досягають за товщини хромового покритті 16...18 мкм.

4.4. Експериментальні дослідження геометричних параметрів циліндричних деталей

Циліндри офсетних аркушевих машин вимагають високої точності під час виготовлення, що зумовлено високими швидкостями, тиском, вібраційними навантаженнями [110-111]. Для реалізації процесу двобічного друкування на поверхню друкарського циліндра монтують противідмарювальну металеву пластину. Щільне прилягання двох поверхонь залежить від якості поверхні циліндра й обумовлюється геометричною точністю. Тому актуальним є питання збереження геометричних розмірів друкарського циліндра після обробки методом вібраційного накатування і хромування.

Відхилення від круглості – це величина, яка становить найбільшу відстань від точок реального профілю до прилеглого кола. Такі відхилення істотно впливають на якість робочих поверхонь деталей машин і знижують довговічність деталі, збільшують вібрацію, погіршують якість продукції.

Відхилення від круглості оброблених поверхонь з використанням комплексної технології вимірювали на кругломірі моделі 298 у трьох поперечних перерізах з одночасним записом круглограм та відхилень. Цифрову обробку виконували на комп'ютері з допомогою програми Mathcad15.

Принцип роботи кругломіра 298 ґрунтується на оцупуванні перетворювачем поверхні деталі, яка обертається разом із предметним столом і шпинделем. Радіальні коливання щупа перетворюються на електричний сигнал. Сигнал з перетворювача потрапляє у вимірювальний пристрій, підсилюється й подається на вхід записувального пристрою (рис. 4.15).

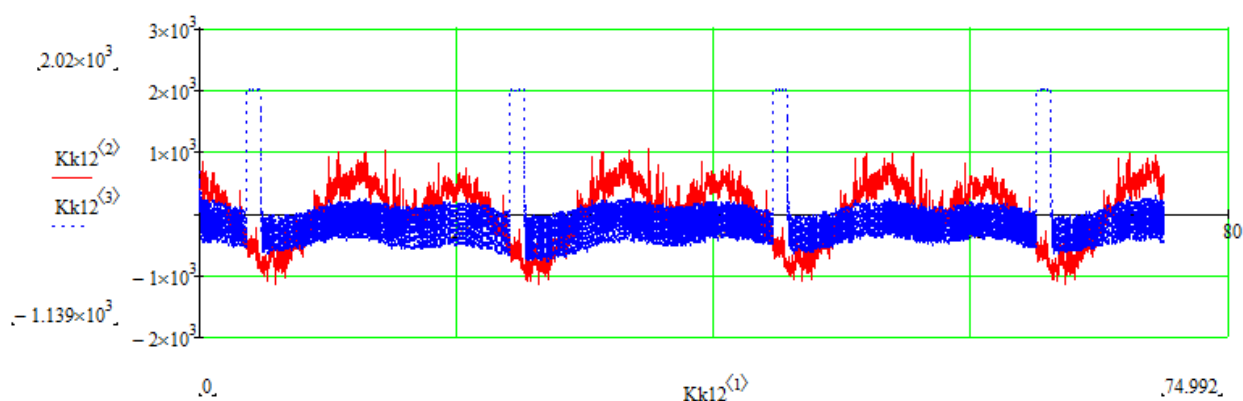


Рис. 4.15. Радіальні коливання величини радіуса поверхні зразка

Після запису виконувалося тарування величин за схемою, зображеною на рис. 4.16.

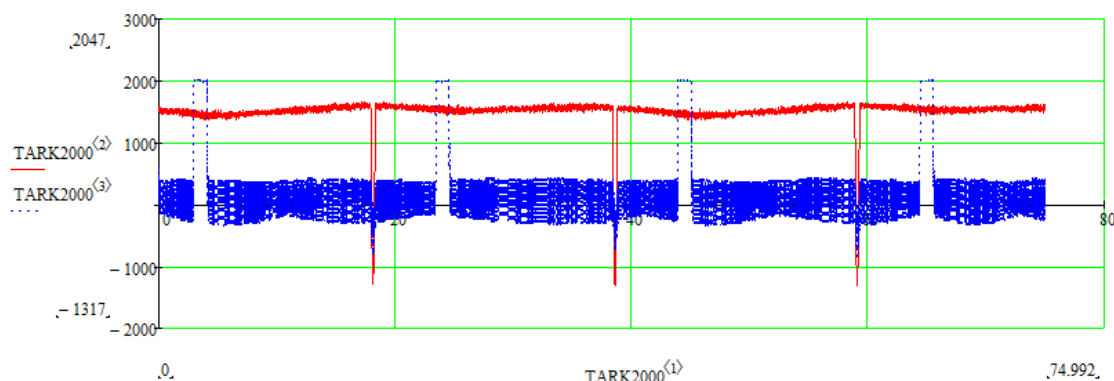


Рис. 4.16. Схема тарування

Особливістю друкування є контактування протилежних металевих пластин та друкарського циліндра. Відхилення розмірів друкарського циліндра під час його виготовлення чи відновлення призводить до проковзування, двоїння чи інших дефектів, оскільки високі вимоги до якості поліграфічної продукції вимагають чіткої синхронізації між формним, офсетним і друкарським циліндрами.

Точність геометричних розмірів друкарського циліндра оцінювали за показником відхилення від круглості, яке визначають найбільшою відстанню від точок реального профілю поперечного перерізу циліндричної поверхні до прилеглого кола мінімального радіуса. Було проведено дослідження зразків після вібраційного накатування та комплексного технологічного процесу..

Застосована методика дозволила визначити вплив комплексного технологічного процесу виготовлення друкарського циліндра за рахунок геометричних відхилень на його експлуатаційні характеристики та якість відбитка.

У ДСТУ ISO 286-1-2002 «Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок» [112] встановлено 16 ступенів точності форми. Залежно від співвідношення між допуском розміру і допусками форми встановлено вимоги відносної точності:

А – нормальна відносна геометрична точність (допуск форми або розміщення поверхонь становить $\approx 30\%$ від допуску розміру);

В – підвищена геометрична точність ($\approx 20\%$);

С – висока геометрична точність ($\approx 12\%$).

На рис. 4.17–4.18 зображено круглограми відхилення від круглості друкарського циліндра після вібраційного накатування та після комплексного технологічного процесу.

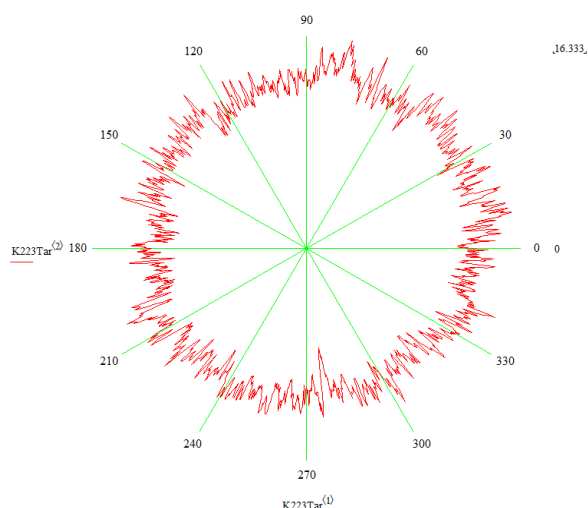


Рис. 4.17. Круглограма відхилення від круглості друкарського циліндра після вібраційного накатування

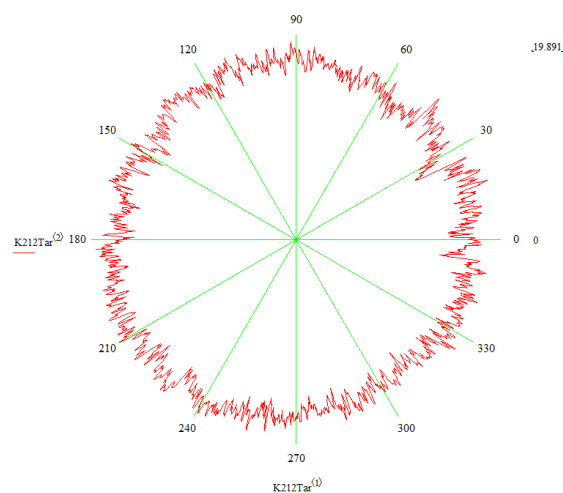


Рис. 4.18. Круглограма відхилення від круглості друкарського циліндра після комплексного технологічного процесу

Проаналізувавши отримані результати круглограм можна зробити висновок, що коло має стабільний характер, відхилення становлять 8...12 мкм. Допуск круглості відповідає рівню А (30 %) відносної геометричної точності і 5...6 квалітету точності. Такий результат свідчить про високий рівень геометричної точності після застосування комплексного технологічного процесу.

4.5. Контроль якості покриття

Якість хромованих покриттів визначають за загальним виглядом, товщиною шару, міцністю зчеплення.

Зчеплення металевих частинок з основою відбувається за рахунок механічного зчеплення, можливої адгезії. Експериментально встановлено, що зчеплення залежить передусім від підготовки поверхні і властивостей нанесеного шару хрому та основного матеріалу. Випробування міцності зчеплення служить для того, щоб встановити, чи забезпечує цей спосіб підготовки поверхні деталі під напилення достатню міцність зчеплення покриття з основним металом.

Міцність зчеплення покриття визначають шліфуванням його абразивним кругом. Для дослідження зчеплення використовували круглошліфувальний верстат 3М151 з режимами різання, наведеними в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Режими круглого зовнішнього шліфування хромованих поверхонь
під час досліджування міцності зчеплення

№ з/п	Шорсткість R_a , мкм	Подача		Швидкість деталі, м/хв	Кількість зачисних заходів
		поперечна, мм/подв.х	поздовжня, мм/об		
1	0,08–0,16	0,005–0,01	3–6	15–30	5–30
2	0,16–0,32	0,01–0,015	6–10	15–30	5–30
3	0,32–0,63	0,01–0,02	10–15	30–60	1–5
4	0,63–1,25	0,03–0,04	20–30	30–60	1–5

Якість покриття перевіряли оглядом поверхні після хромування. Зовнішній вигляд хромованого покриття – гладке, без шишковитості. На ній не виявлено здуттів, відколів та інших зовнішніх ознак поганого зчеплення після шліфування поверхні, яка оброблена із застосуванням комплексної технології. Відшаровування покриття після шліфування не виявлено.

РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

5.1. Дослідження зносостійкості

На основі аналізу, виконаного в розд. 1, було виявлено, що значну увагу треба приділити експериментальним дослідженням на зносостійкість, що зумовлено великими навантаженнями у процесі експлуатації роботи поліграфічних машин. Так, наприклад, у конструкції контактувальної пари «друкарський циліндр – противідмарювальна металева пластина (ПМП)» є агресивне середовище у зоні перебігу процесу друкування. Зношування деталей обмежує час роботи будь-якого обладнання і призводить до погіршення працездатності, а саме, до зменшення міцності деталей, які контактують, підвищення шуму і вібрації та зниження кінематичної точності. Знаючи матеріал, з якого виготовлено деталь, та умови її роботи можна визначити вид зношування поверхні деталей [113].

Зношування поверхні можна побачити, приміром, у зміні розмірів деталей. Так, наприклад, зношування друкарського циліндра буде суттєво впливати на точність відтворення текстово-образотворчої інформації на папері, адже навіть незначне зношування друкарського циліндра потребує його відновлення або заміни [114].

Якщо детально досліджувати фрикційні характеристики різних конструкційних матеріалів можна дійти висновку, що зносостійкість – не стала величина, вона визначається здебільшого наявністю вторинних структур, які формуються на робочих поверхнях у процесі тертя, а також у результаті нанесення хімічного покриття. Зростанню зносостійкості сприяє збільшення твердості поверхонь деталей, які працюють за умов тертя. Зношування також може залежати й від впливу корозії та механічних напружень. Із цього випливає, що поверхневий шар нанесеного покриття має забезпечити мінімальне початкове зношування, а отже, підвищити зносостійкість роботи деталей у вузлах тертя під час експлуатації.

Втрата працездатності будь-якого обладнання у процесі експлуатації пов'язана з руйнуванням поверхневого шару деталі, яка працює в умовах тертя, тому основним завданням є забезпечення довговічності і надійності деталей машин за рахунок підвищення їх зносостійкості завдяки застосуванню комплексного технологічного процесу, який включає вібраційне накатування **ЧРМР**, що належить до оздоблювально-зміцнювальної обробки, і наступне хромування як під час виготовлення деталей, так і у процесі відновлення зношених деталей [3].

На інтенсивність зношування впливають умови тертя між поверхнями деталей і робочим середовищем, що залежать від властивостей матеріалу контактувальних (тертьових) поверхонь деталей, їх фізико-механічних властивостей, форми та розмірів, режимів роботи, змащування, шорсткості поверхонь тертя, рівня навантаження тощо [3].

Завдяки зробленому аналізу можна зазначити, що, враховуючи навантаження, характерні для роботи поліграфічного обладнання, одним з найбільш вагомих факторів погіршення техніко-технологічних можливостей машин, руйнування деталей, появи відхилень у якості друкування є такі процеси, як зношування, корозія та знеміцнення [26, 12], тому основну увагу потрібно приділити забезпеченню високої антифрикційності для працездатності обладнання, яка матиме низькі коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування контактувальних пар.

Для отримання достовірних результатів слід зосередити увагу на таких процесах, як моделювання реальних умов тертя, рівень навантаження, якість контактувальної пари, властивості тертьових матеріалів, форма і розміри пар, які працюють у вузлах реального обладнання. Отже, для зразків типу «тіла обертання» було зімітовано умови тертя на обладнанні, яке має зовнішню циліндричну частину.

Експериментальні дослідження інтенсивності зношування проводили в умовах «сухого» тертя на зразках зі сталі 45. Коли рухом тертя є ковзання, потрібно підібрати контртіло із бронзи, чавуну або сталі, якщо кочення, то обирають чавунні чи сталеві деталі. Для умов експлуатації у нашому дослідженні було обрано контртіло із бронзи марки Бр.АЖ-9-4. Випробування на зношування проводили в умовах фретінгу за стандартними методиками, описаними в ДСТУ 7787:2015 «Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробовування матеріалів на зношування під час фретінгу та фретінг-корозії» [115] на токарно-гвинторізному верстаті з технологічними режимами, які відповідають реальним умовам експлуатації контактувальної пари.

Однією з методик ступеня зношування є оцінювання його масовим методом – зразок потрібно зважувати до і після випробування на аналітичних вагах Axis ANG 50C (точність визначення маси становить 0,0001 г). Зважування відбувалося протягом перших 300 хв через кожні 20 хв, а в наступні 45 год – через кожні 2 год.

Оскільки експериментально визначити ймовірність утворення частинок зношування вельми складно, у більшості досліджень критерієм зношування вважають значення інтенсивності зношування. Для розрахунку інтенсивності зношування (I , кг/м²) за втратою ваги скористалися формулою

$$I = \frac{\Delta m}{s}, \quad (5.1)$$

де Δm – втрата ваги, кг;

s – площа тертя зразка, m^2 .

На рис. 5.1 зображено графіки залежності інтенсивності зношування від часу випробування на циліндричних зразках зі сталі 45. Для порівняння різних технологічних процесів унаочнено залежності після:

- зовнішнього чистового шліфування;
- зовнішнього чистового шліфування і наступного вібраційного обкатування із ЧРМР;
- зовнішнього чистового шліфування і наступного хромування;
- зовнішнього чистового шліфування і наступного комплексного технологічного процесу (вібраційного обкатування із ЧРМР із наступним хромуванням).

Зношування деталей під дією навантажень стабілізується після етапу припрацювання й залишається майже незмінним упродовж усього ресурсу роботи.

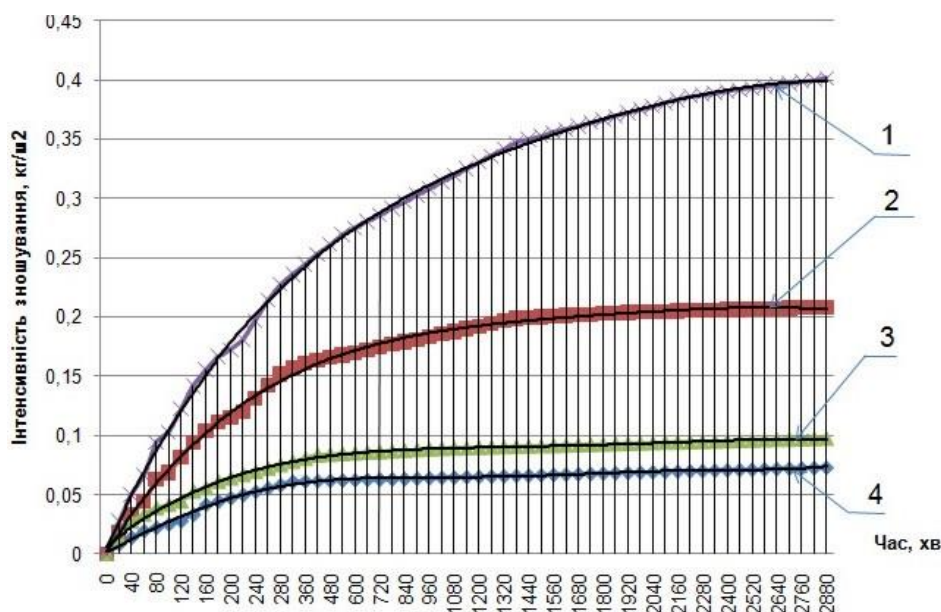


Рис. 5.1. Графік залежності інтенсивності зношування від часу випробування зразків зі сталі 45 після: 1 – зовнішнього чистового шліфування; 2 – зовнішнього чистового шліфування і наступного вібраційного обкатування із ЧРМР; 3 – зовнішнього чистового шліфування і наступного хромування; 4 – зовнішнього чистового шліфування і наступного комплексного технологічного процесу (вібраційного обкатування із ЧРМР із наступним хромуванням)

Як видно з рис. 5.1, час припрацювання становить близько 200 хв, якщо використано комплексну технологію, 240 хв – після зовнішнього чистового шліфування і наступного хромування, 600 хв – після зовнішнього чистового шліфування і наступного вібраційного обкатування із ЧРМР, 20 год – після зовнішнього чистового шліфування. Виявлено, що після припрацювання контактувальної пари у всіх запропонованих технологічних процесах стабілізується процес зношування, а інтенсивність зношування практично не змінюється, що підтверджується значеннями інтенсивності зношування на рис. 5.1. Також можна відмітити, що найменш інтенсивне зношування відбувається на зразках після застосування комплексної технології.

Відповідно до результатів проведених експериментальних досліджень комплексна технологія забезпечує підвищення зносостійкості у 4...4,5 разів порівняно із зовнішнім чистовим шліфуванням і не менше ніж у 2 рази порівняно з вібраційним обкатуванням. Також спостерігається така закономірність: найбільше значення зносостійкості мають покриття з найбільшими фізико-механічними властивостями, зокрема мікротвердістю.

Одним з етапів роботи були експериментальні дослідження триботехнічних властивостей:

- з вібраційним обкатуванням мікрорельєфу гексагонального типу;
- з вібраційним обкатуванням **ПРМР** гексагонального типу і наступним хромуванням.

Умови проведення дослідів були максимально наближені до реальної роботи обладнання. За основу взято контактувальну пару «друкарський циліндр – противідмарювальна пластина», при цьому було визначено такі параметри:

- швидкість ковзання $V = 0,5$ м/с;
- навантаження $P = 2; 3; 4,5; 6$ кг;
- схема контакту – контртіло сталь 45 (друкарський циліндр) і зразок сталь 20 (противідмарювальна металева пластина);
- шлях тертя – 2 км, тертя без змащування.

На рис. 5.2 показано схему випробувань триботехнічних властивостей контактувальної поверхні друкарського циліндра й противідмарювальної металевої пластини. Перед експериментальним випробуванням пластину закріплювали у спеціальному тримачі, щоб забезпечити найбільшу площу пари для контактування.

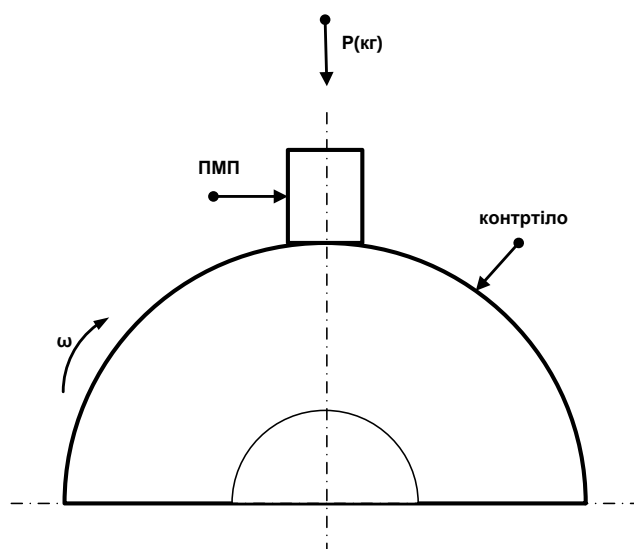
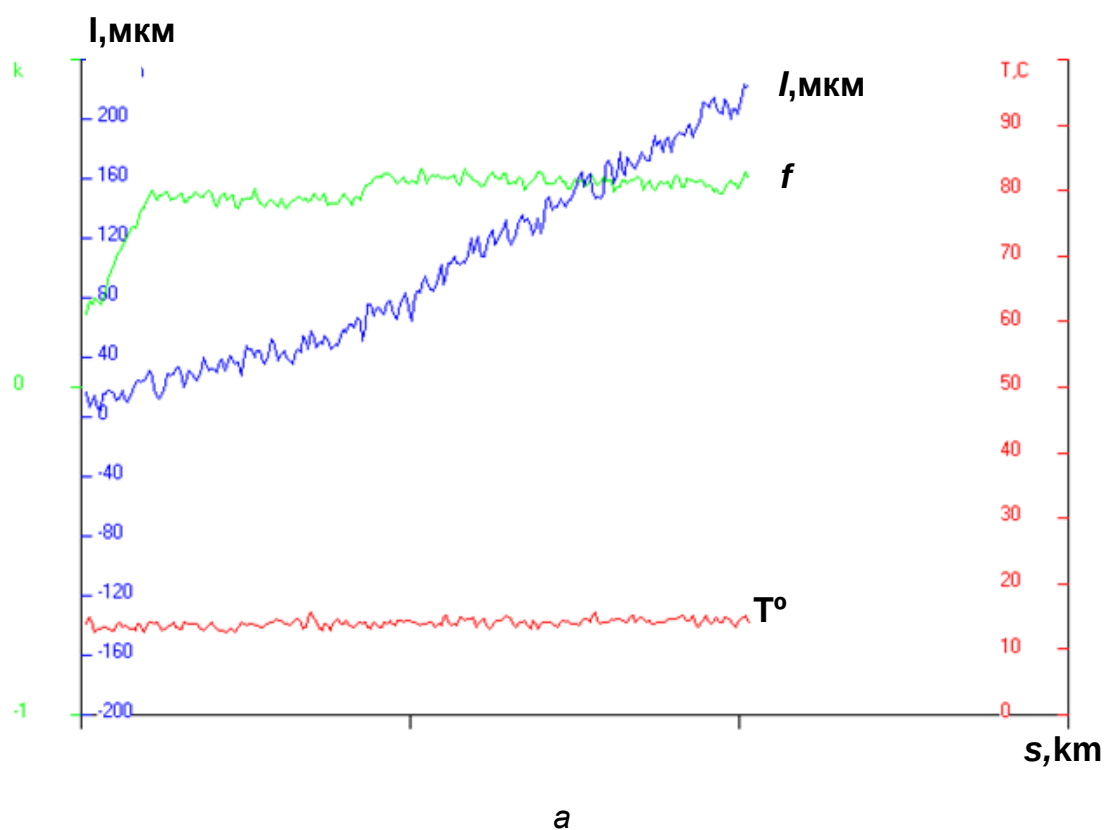


Рис. 5.2. Схематичне зображення випробувань триботехнічних властивостей

Випробовування триботехнічних властивостей проводили на машині тертя М-22М з наступною обробкою результатів на комп'ютері.

Залежність інтенсивності зношування контактувальної пари «друкарський циліндр – протівідмарювальна металева пластина» показано на рис. 5.3.



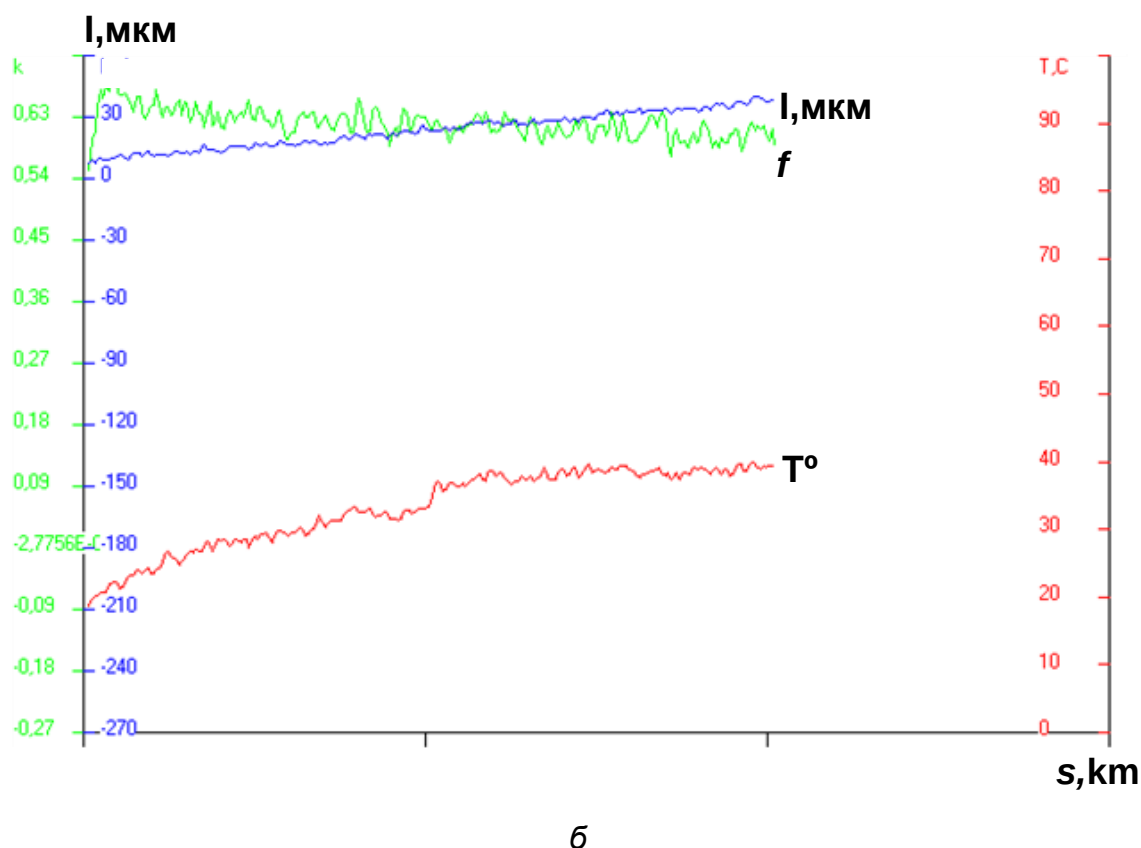


Рис. 5.3. Інтенсивність зношування від навантаження $P = 4$ кг за швидкості $V = 0,5$ м/с: а – без обробки поверхні друкарського циліндра методом вібраційного обкатування; б – комплексного технологічного процесу (з вібраційним обкатуванням мікрорельєфу гексагонального типу і наступним хромуванням)

В основному процес руйнування поверхонь деталей відбувається як результат відносних коливальних переміщень між контактувальною парою унаслідок вібрації або періодичних деформацій елементів у вузлах тертя. Процеси абразивного руйнування, захоплювання, втомно-корозійні явища характерні для ділянок, які пошкоджені фретинг-корозією. Поверхні контактувальної пари руйнуються і під час простою унаслідок вібрації, яка виникає від інших робочих механізмів [116]. У зоні контакту між контактувальною парою може утворитися зошування, що спричиняє інтенсифікацію процесів руйнування аж до абразивного зношування. Саме ця стадія фретинг-корозії є неприпустимою під час експлуатації машин.

дослідження з визначення зносостійкості контактувальної пари «друкарський циліндр – протилідмарювальна металева пластина» проводили на 27 зразках, результати досліджень наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати триботехнічних властивостей кнтактувальної пари
«друкарський циліндр – противідмарювальна металева пластина»

№ з/п	Навантаження P , кг	f Коєфіцієнт тертя	Інтенсивність зношування контактувальної пари I , мкм/км	Температура зразка T , °C
Без хромування поверхні друкарського циліндра				
1	2	0,85	10,4	35
2	3	0,83	12,3	38
3	4	0,72	15,1	44
4	5	0,78	18,8	56
Із хромуванням поверхні друкарського циліндра				
5	2	0,68	7,4	–
6	4	0,63	9,4	–
7	6	0,54	11,6	42

Як видно з рис. 5.3, в умовах випробуваннях на зразках після зовнішнього чистового шліфування (без обробки методом вібраційного обкатування) за $P = 4$ кг і швидкості $V = 0,5$ м/с зі збільшенням шляху тертя S інтенсивність зношування I досягає 18,8 мкм/км; в умовах випробуваннях на зразках із застосуванням комплексної технології (вібраційне обкатування з нанесенням мікрорельєфу гексагонального типу і наступного хромування) за тих самих $P = 4$ кг та $V = 0,5$ м/с зі збільшенням шляху тертя інтенсивність зношування I сягає 7,4 мкм/км. Отже, можна зробити висновок, що за однакових умов випробовування при застосуванні поверхневої обробки методом вібраційного обкатування з нанесеним гексагональним мікрорельєфом і наступним хромуванням інтенсивність зношування зростає більш ніж удвічі. Це можна пояснити формуванням на поверхні друкарського циліндра регулярного мікрорельєфу гексагонального типу ввігнутої форми. Результати свідчать не тільки про збільшення твердості (див. розд. 4), але й про суттєве підвищення зносостійкості у 2,5...2,8 рази поверхні друкарського циліндра.

5.2. Дослідження корозійної стійкості

Оцінити корозійну стійкість металевих покриттів можна завдяки двом методам:

1. За допомогою вагового показника знаходять втрату ваги зразка за відповідний проміжок часу на певній площі покриття. Для цього досліджуваний зразок занурюють в агресивне середовище на певний час. Після цього зразок дістають, зважують і розраховують втрату ваги за відповідними стандартними методиками. Щоб дослідити корозійну стійкість за цим методом, потрібно багато часу для

проведення випробування, оскільки необхідне точне зважування для покриття, руйнування якого відбувається з малою швидкістю. Також отриманим результатом є середнє значення швидкості корозії, а час проведення дослідження є тривалим і різним для кожного зразка.

2. За допомогою вимірювання поляризаційного опору – ця величина обернена до швидкості корозії. Для проведення такого виду досліджень потрібний спеціальний стенд, який містить індикатори поляризаційного опору, електроди, один з яких має бути виготовлений з досліджуваної сталі. Електроди мають бути міцно закріплені в затискачах та опущені в агресивне середовище. На електроди подають струм і через відповідний проміжок часу вимірюють поляризаційний опір на них. За відповідними методиками отримані значення швидкості корозії перераховують у масові або глибинні величини корозії.

Для проведення експериментальних досліджень на корозійну стійкість скористалися другим методом поляризаційних кривих. За допомогою цього методу отримано вольт-амперні залежності випробовувальних зразків, які були повністю занурені у корозійне середовище, з наступним оцінюванням значень корозійного потенціалу і, відповідно, швидкості корозії у струмових одиницях. Для цього застосовували скляну трьохелектродну електрохімічну комірку з виносними електродами. Як робочий електрод було взято випробувальний зразок з робочою поверхнею площею $0,5 \text{ см}^2$. На неробочу частині електрода було нанесено кислотійкий лак. Для допоміжного електрода скористалися платиною. Ці два електроди, які є катодом та анодом, розділили напівпроникною перегородкою, що дало можливість зменшити газовідведення на допоміжному електроді. Для порівняльного електрода скористалися хлорсрібним електродом. Після отримання значення потенціалів було здійснено перерахунок щодо нормального водневого електрода.

Для хімічного полірування приготували ефективний елетроліт. Агресивним середовищем слугував розчин сірчаної кислоти концентрацією $0,5 \text{ моль/л}$. Випробувальний зразок повністю опускали в електроліт і витримували певний час.

Для отримання поляризаційних вимірів застосовували потенціостат ПИ-50-1.1 й програматор ПР-8. Програматор слугував для того, щоб задати розгортку потенціалу, яка була рівною 1 мВ/с , і таким чином вимірювали зміни струму в часі. Схематично стенд для отримання результатів досліджень зображено на рис. 5.4.

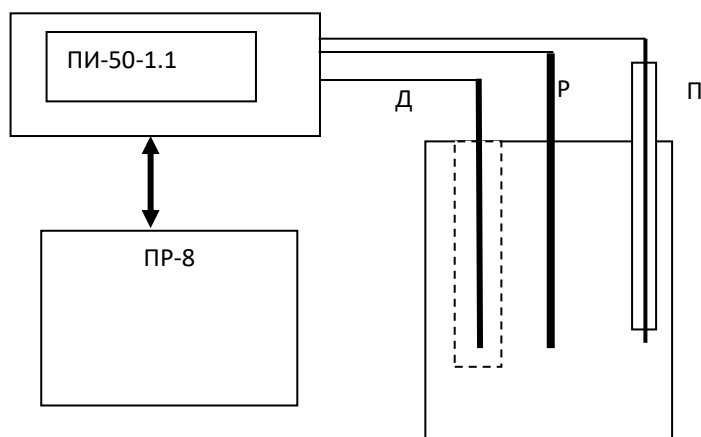


Рис. 5.4. Схема стенду для проведення досліджень на корозійну стійкість: Д – допоміжний електрод, виготовлений із платини; Р – робочий електрод (випробовувальний зразок); П – порівняльний електрод

Отримані значення потенціалів одразу перерахували у водневу шкалу, а зі значення сили струму отримували величину густини струму. За отриманими даними побудували поляризаційні криві, де координатами по осі ординат є потенціал, а по осі абсцис – логарифм густини струму. Для визначення густини струму корозії побудовано дотичні до анодної та катодної ділянок кривої, і на перетині отримали значення густини струму корозії.

Для проведення експериментальних досліджень методом поляризаційних кривих порівнювали випробовувальні зразки, виготовлені за такими технологіями:

- зовнішнє чистове шліфування з наступним вібраційним обкатуванням;
- зовнішнє чистове шліфування з наступним хромуванням;
- зовнішнє чистове шліфування з наступним комплексним технологічним процесом.

Дослідження корозійної поведінки за вищенаведеними технологіями показано на рис. 5.5–5.7.

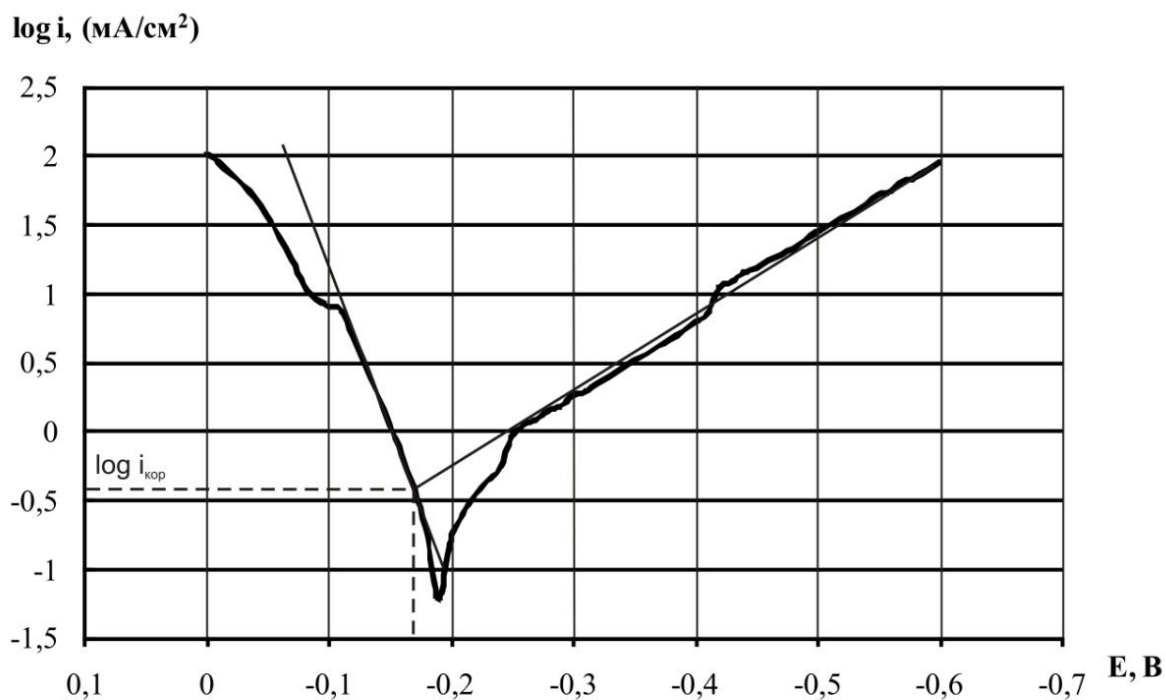


Рис. 5.5. Поляризаційні криві випробувального зразка після зовнішнього чистового шліфування з наступним вібраційним обкатуванням

На рис. 5.5 координати точки перетину лінійних ділянок поляризаційних кривих показують на осі абсцис потенціал корозії E , який має значення $-0,18$ В, а на осі ординат – логарифм густини струму корозії $\log$, що має значення $-0,45$. Логарифму густини струму відповідає значення густини струму корозії $1,22 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

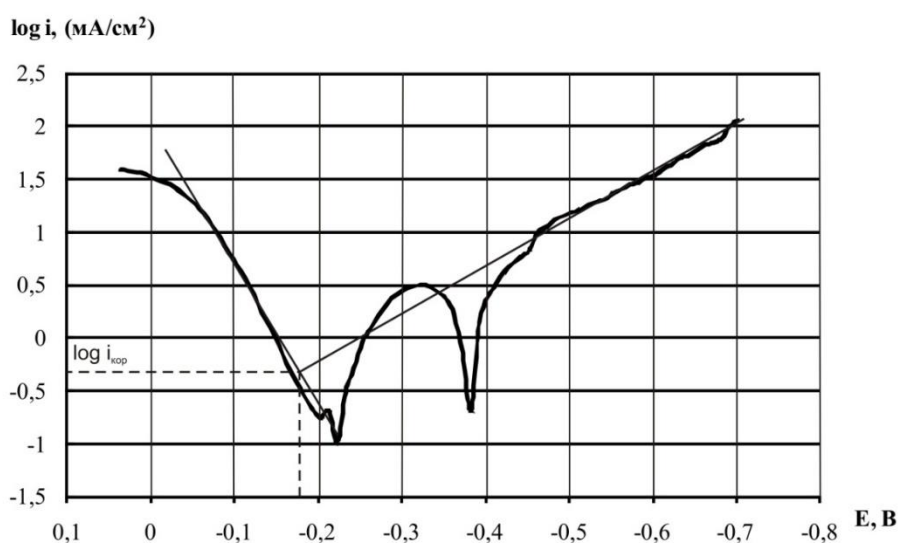


Рис. 5.6. Поляризаційні криві випробувального зразка після зовнішнього чистового шліфування з наступним хромуванням

На рис. 5.6 координати точки перетину лінійних ділянок поляризаційних кривих показують на осі абсцис потенціал корозії E , який має значення $-0,18$ В, а на осі ординат – логарифм густини струму корозії $\log$, що має значення $-0,35$. Логарифму густини струму відповідає значення густини струму корозії $0,409$ mA/cm^2 .

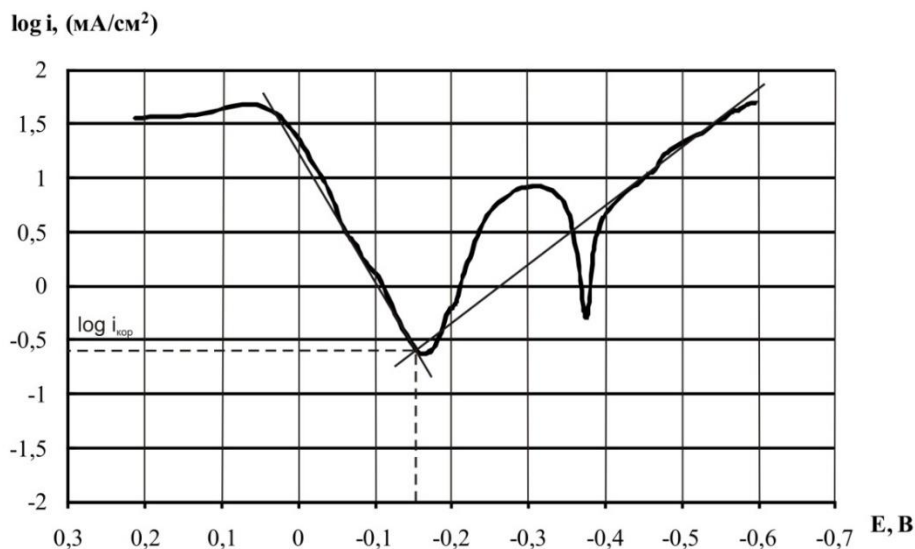


Рис. 5.7. Поларизаційні криві випробовувального зразка після зовнішнього чистового шліфування і наступного комплексного технологічного процесу

На рис. 5.7 координати точки перетину лінійних ділянок поляризаційних кривих показують на осі абсцис потенціал корозії E , який має значення $-0,16$ В, а на осі ординат – логарифм густини струму корозії $\log$, що має значення $-0,6$. Логарифму густини струму відповідає значення густини струму корозії $0,251$ mA/cm^2 .

Отже, бачимо, що густина струму корозії після вібраційного обкатування з наступним хромуванням є меншою, ніж після зовнішнього чистового шліфування з наступним вібраційним обкатуванням. Також можна зазначити, що саме на графіку на рис. 5.7 є додатковий пік окиснення водню, якого не було на рис. 5.5 та 5.6.

За допомогою значень густини струму корозії та отриманих вольт-амперних залежностей випробовувальних зразків у корозійному середовищі можна дійти висновку, що застосування комплексної технології (вібраційне обкатування з наступним хромуванням) дозволяє знизити густину струму корозії, що свідчить про підвищення корозійної стійкості у 1,5...2 рази, якщо порівнювати зовнішнє чистове шліфування з наступним хромуванням, і у 5...6 разів після зовнішнього чистового шліфування з наступним вібраційним обкатуванням.

Можемо констатувати, що запропонований комплексний технологічний процес дозволяє збільшити корозійну стійкість деталей, які працюють в умовах агресивного середовища.

Отже, наведені експериментальні результати підтверджують доцільність та правильність застосування розробленої комплексної технології вібраційного обкатування з наступним хромуванням у поліграфічному виробництві.

Узагальнюючи всі отримані теоретичні та експериментальні результати, можна стверджувати про безумовну доцільність широкого впровадження комплексної технології (вібраційного обкатування з наступним хромуванням) для виготовлення та відновлення деталей, які працюють в умовах контактної взаємодії поліграфічного обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Монографія висвітлює науково-практичне вирішення задачі, яка полягає у підвищенні якості поверхневого шару та експлуатаційних властивостей деталей класу «тіл обертання» за рахунок застосування комплексної технології, яка полягає у формуванні синусоїдального і гексагонального мікрорельєфів увігнутої форми.

Проаналізовані особливості експлуатації поліграфічного обладнання та збої його роботи і, а також зібрані статистичні дані співвідношення причин браку на аркушевих, рулонних і флексодрукарських машинах, післядрукарському обладнанні, показали, що зношуваність деталей контактувальної пари призводить до браку продукції, і це є однією з актуальних проблем, яку потрібно вирішити.

На основі аналізу літературних фахових джерел розроблено класифікацію, яка включає методи зміцнення, які можна застосовувати для виготовлення і відновлення деталей поліграфічного обладнання, виокремлено і класифіковано методи поверхнево-пластичного деформування, що дає можливість розглядати нові технології і поєднувати декілька методів у комплексний технологічний процес.

Показано вплив комплексного технологічного процесу на показники якості у разі друкування в параметричному вигляді, що дає можливість прогнозувати параметри якості поліграфічної продукції на етапі виготовлення деталей.

Для запропонованої технології вібраційного накатування з наступним хроматуванням встановлено аналітичні залежності між технологічними факторами і параметрами для синусоїдального і гексагонального мікрорельєфу увігнутої форми, що допускає можливість відтворити на деталях класу «тіла обертання» площу контакту – за допомогою її розрахованої величини можна спрогнозувати підвищення зносостійкості.

На основі теоретико-експериментальних досліджень отримано дві математичні моделі прогнозування інтенсивності зношування та величини розтискування растрової крапки під час друкування офсетним способом друку, завдяки яким можна керувати експлуатаційними властивостями і параметрами якості відбитків. Аналіз знайдених моделей для розрахунку інтенсивності зношування і розтискування крапки на офсетних, крейдованих матових і глянцеви паперах свідчить, що взаємодія таких параметрів, як шорсткість поверхні, мікротвердість, товщина хромованого покриття забезпечує високі експлуатаційні властивості, а враховуючи тиск під час друкування та товщину фарбового шару можна забезпечити стандартизовану величину розтискування крапки і досить високу якість відбитка.

Чисельне моделювання комплексного технологічного процесу для гексагонального і синусоїдального мікрорельєфу увігнутої форми показало, що максимальна величина деформацій і напружень відбувається під час контактування деформувального елемента із деталлю. У разі відходження від зони контакту величина деформацій і напружень зменшується і наближається до нуля.

Розроблена комплексна технологія покращила фізико-механічні властивості поверхневого шару. Так, можна побачити, що мікротвердість поверхні після нанесення мікрорельєфу збільшилася в 4...4,5 рази порівняно із зовнішнім чистовим шліфуванням, відбулося також посилення поверхневого зміцнення у 1,2...1,6 разів порівняно з твердістю основного металу та у 2,7...3,3 разів порівняно із хромованою поверхнею.

Комплексний технологічний процес дозволив забезпечити підвищення експлуатаційних властивостей, а саме: зносостійкість – у 4...4,5 рази порівняно із зовнішнім чистовим шліфуванням й у 2...2,8 рази порівняно з вібраційним обкатуванням, корозійна стійкість – у 1,5...2 рази порівняно зі зразками після хромування, й у 5...6 разів порівняно зі зразками після вібраційного обкатування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'янка І. С. Стан і аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням / І. С. Дерев'янка // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2007. – № 583. – С. 18–24.
2. Каплун В. Г. Комплексні технології зміцнення поверхні деталей машин / В. Г. Каплун, П. В. Каплун, Ю. І. Шалапко // Вестн. двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 132–135.
3. Sheichenko, Viktor, et al. "Devising Technologies for Harvesting Hemp with Belt Threshers." Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 1, no. 1, 2022, pp. 67-75, doi:10.15587/1729-4061.2022.251126.
4. Suyitno, Effect of cold working and sandblasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI 316L stainless steel / Suyitno, Budi Arifvianto, Teguh Dwi Widodo, Muslim Mahardika, Punto Dewo and Urip Agus Salim // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – Vol. 19. – N 12. – Dec 2012. – P. 1093. – (DOI: 10.1007/s12613-012-0676-1)
5. Хмілярчук О. І. Комбіновані способи поверхневого пластичного деформування деталей поліграфічного обладнання / О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства. – 2006. – № 3. – С. 74–80.
6. Несхозієвська Т. А. Зміцнення поверхонь деталей аркушепровідних систем офсетних друкарських машин / Т. А. Несхозієвська, О. І. Лотоцька // Наукові записки / Українська академія друкарства. – 2013. – № 4. – С. 93–98.
7. Лотоцька О. І. Сучасні фінішні методи підвищення експлуатаційних властивостей деталей поліграфічних машин поверхневим пластичним деформуванням і хромуванням / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства ; ВПІ НТУУ «КПІ». – 2010. – № 2. – С. 44–50.
8. Несхозієвський, А. В. (2010). Розробка технологічного процесу відновлення циліндричних деталей офсетних друкарських машин. Технологія і техніка друкарства, (4(30)), 122–126. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(30\).2010.55732](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(30).2010.55732).
9. Віцюк Ю. Ю. Підвищення працездатності вузлів тертя поліграфічних машин / Ю. Ю. Віцюк, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. О. Мельник // Технологія і техніка друкарства ; ВПІ НТУУ «КПІ». – 2010. – № 2. – С. 4–9.

10. Киричок, П. О., Несхозієвський, А. В., Шевчук, А. В. (2012). Відновлення циліндричних деталей поліграфічного обладнання на основі селективних методів. *Технологія і техніка друкарства*, (4(38), 76–81. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(38\).2012.32201](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(38).2012.32201)
11. Дудніков, А. А., Дудник, В. В., Бурлака, О. А., Канівець, О. В., & Кривонос, С. М. (2020). Відновлення деталей поверхневим пластичним деформуванням. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, (4), 251-258. <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.32>
12. Несхозієвський А. В. Технологічне забезпечення відновлення деталей поліграфічного обладнання / А. В. Несхозієвський // *Друкарство молоде : доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф. студ. і асп., Київ, 19-21 квітня 2011 р. ; ВПІ НТУУ «КПІ»*. – 2011. – С. 67–68.
13. Киричок П. О. Експериментальні дослідження геометричних параметрів циліндричних деталей поліграфічних машин при комплексній обробці / П. О. Киричок, О. І. Лотоцька // *Технологія і техніка друкарства ; ВПІ НТУУ «КПІ»*. – 2011. – № 3. – С. 4–12.
14. Лотоцька О. І. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей поліграфічних машин / О. І. Лотоцька // *Технологія і техніка друкарства ; ВПІ НТУУ «КПІ»*. – 2008. – № 3-4. – С. 16–20.
15. Shreyas P. Overview of research on Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) / P. Shreyas, M. A. Trishul // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. – Vol. 1, Issue 4. – December 2014. – P. 205–207. – (DOI 10.17148/IARJSET).
16. Киричок П. О. Експериментальні дослідження процесів оздоблювально-зміцнюючої обробки / П. О. Киричок, О. І. Хмілярчук // *Технологія і техніка друкарства*. – 2009. – Вип. 4. – С. 4–15.
17. Wang Z. B. Wear and corrosion properties of a low carbon steel processed by means of SMAT followed by lower temperature chromizing treatment / Z. B. Wang, J. Lu, K. Lu // *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 201, Issue 6. – 4 December 2006. – P. 2796-2801. – (Doi:10.1016/j.surfcoat.2006.05.019).
18. Jyh-Wei Lee. Evaluation of microstructures and mechanical properties of chromized steels with different carbon contents / Lee Jyh-Wei, Duh Jenq-Gong // *Surface*

and Coatings Technology. – Vol. 177–178. – 30 January 2004. – P. 525–531. – (Doi:10.1016/j.surfcoat.2003.08.031).

19. ДСТУ ІЕС 60706-2:2008. Ремонтпридатність устаткування. Частина 2. Вимоги до ремонтпридатності та дослідження на етапі проектування та конструювання (ІЕС 60706-2:2006, IDT). Чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2010. 39 с.

20. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Чинний від 1997-01-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 1997. 16 с.

21. Зенкін, М. А., Несхозієвський, А. В. (2012). Створення нормативно-технічної бази для здійснення контролю якості зміцнюючих покриттів. Технологія і техніка друкарства, (3(37), 27–35. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(37\).2012.32379](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(37).2012.32379)

22. Мельников О. В. Технологія плоского офсетного друку : підручник / О. В. Мельников ; за ред. д-ра техн. наук, проф. Е. Т. Лазаренка. – 2-ге вид., виправл. – Л. : УАД, 2007. – 388 с.

23. Кохановський, В. О. (2013). Методика збору та обробки експлуатаційної інформації для визначення показників надійності поліграфічних машин. Технологія і техніка друкарства, (3(41), 37–43. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(41\).2013.30764](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(41).2013.30764)

24. Олійник В. Г. Теоретичне і експериментальне дослідження опоряджувально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / В. Г. Олійник // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2006. – № 1–2. – С. 149–153.

25. Несхозієвський, А. В. (2013). Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей поліграфічного обладнання на основі системи контролю. Технологія і техніка друкарства, (1(39), 18–27. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(39\).2013.31034](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(39).2013.31034)

26. Киричок П. О. Технологічне забезпечення працездатності та надійності елементів та вузлів поліграфічних машин / П. О. Киричок // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2003. – № 1. – С. 71–79.

27. Лотоцька О. І. Комплексна технологія формування мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин : дис. ...канд. техн. наук : 05.05.01 / Лотоцька Оксана Іванівна. – Київ, 2012. – 179 с.

28. *Несхозієвський А. В.* Розробка технологічного процесу відновлення деталей поліграфічного обладнання / А. В. Несхозієвський // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2010. – № 4. – С. 122–126.
29. *Олійник В. Г.* Алгоритм керування технологічним процесом оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / В. Г. Олійник // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 1–2. – С. 188–195.
30. *Матвійчук В. А.* Вдосконалення методу поверхневого пластичного деформування на основі аналізу напружено-деформованого стану поверхневого шару виробів / В. А. Матвійчук, В. І. Драчишин // Серія: Технічні науки/ Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету./ Наші видання/. – Том 2. – № 10. – Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2012. – С. 172–177.
31. *Косіюк М. М.* Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою / М. М. Косіюк, С. А. Костюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 6. – С. 101-106.
32. *Зигуля С. М.* Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей контактувальних пар аркушевих офсетних машин : дис. ...канд. техн. наук : 05.05.01 / Зигуля Світлана Миколаївна. – Київ, 2015. – 173 с.
33. *Дзюра В. О.* Сучасні проблеми та напрями покращення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин / В. О. Дзюра, В. О. Семеґен // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики» – Тернопіль 29-30 вересня 2022. – С. 142.
34. *Лотоцька О. І.* Підвищення якості та експлуатаційних властивостей циліндричних деталей поліграфічного обладнання при комплексній технології / О. І. Лотоцька // Машинознавство / Львівська «Політехніка». – 2013. – № 7 – 8. – С. 48–53.
35. *Хмілярчук О. І.* Підвищення якості та експлуатаційних властивостей деталей технологічного обладнання / О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 1. – С. 73–77.

36. *Сарафін В.* Особливості вибору методів і засобів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням / В. Сарафін // X Всеукраїнська студентська науково - технічна конференція "ПРИРОДНИЧІ ТА ГУМАНІТАРНІ НАУКИ. АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ" – Тернопіль 29-30 вересня 2022. – С. 153–154 .
37. *Тітов А.* Формування поверхневого шару деталей вигладжуванням для підвищення їх ресурсу: дис. ...канд. техн. наук : 05.03.05 / Тітов Андрей Вячеславович. – Київ, 2011. – 251 с.
38. *Киричок П. О.* Дослідження впливу параметрів мікрорельєфу на якість обробки деталі та експлуатаційні характеристики роліграфічного обладнання / П. О. Киричок, А. В. Несхозиєвський // Технологічні комплекси / Вид-во Луцьк. нац. технол. ун-ту. – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.
39. Zyhulia S., Barauskiene O. Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 3, Issue 12 (99). P. 22–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171808>
40. Barauskiene O., Zyhulia S., Optimal control of the complex process of manufacturing cylindrical parts printing equipment // Технологія і техніка друкарства. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – № 4 (66).; Мова публікації: англійська.
41. Зигуля С. М. Аналіз методів підвищення довговічності деталей поліграфічних машин / С. М. Зигуля // Дев'ята міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», том 2, Чернігів, 14 – 16 травня 2018 р. / Чернігівський національний технологічний університет. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – С. 175–176.
42. *Ремонт автомобілів : навч. посіб. / упоряд. В. Я. Чабанний.* – Кіровоград : Кіровогр. район. друк., 2007. – 720 с.
43. *Стецько А. Є.* Підвищення якості поверхонь деталей, виготовлених і відновлених комплексним методом. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.02.08 – технологія машинобудування / А. Є. Стецько — Тернопіль, 2011. — 8 с.
44. *Стефанишена, О. Б., Зоренко, О. В.* (2020). Сучасні тенденції розвитку глибокого друку. Технологія і техніка друкарства, (3(69), 34–42. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(69\).2020.224199](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(69).2020.224199)

45. Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії: Навчальне видання. [Електронний ресурс]: навч. посібник для аспірантів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» ОНП «Видавництво та поліграфія» третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти / КПІ ім. Ігоря Сікорського / Уклад.: Киричок П. О., Т. А. Роїк. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,05 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 37с.

46. Kipphan, H., *Handbook of Print Media*, Springer-Verlag, ISBN 3-540-67326-1, 2001, Germany.

47. Конспект лекцій з дисципліни «Відновлення деталей» для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» / Укладачі: Левкович М.Г., Гупка А.Б., Сіправська М.Д. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2021. – 136 с.

48. *Какарека Д.* Підвищення надійності машин безперервного лиття заготовок шляхом застосування нових методів відновлення вузлів, що швидко зношуються: дис. ...канд. техн. наук : 05.03.05 / Какарека Денис Леонідлвич. – Маріуполь, 2020. – 171 с.

49. *Посувайло, Володимир Шовкопляс, Максим Романів, Микола Малінін, Володимир.* (2021). Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. Вісник Черкаського державного технологічного університету. 83-97. 10.24025/2306-4412.4.2021.253298.

50. Лотоцька О. І. Узагальнена класифікація пристроїв та інструменту для виконання вібраційного обкатування на деталях поліграфічного обладнання / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2014. – № 2. – С. 112–123.

51. Основи теорії надійності поліграфічного устаткування конспект лекцій / Ю. О. Шостачук; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». [Електронний ресурс] : Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – С. 77.

52. *Гавриш А. П., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю., Олійник В. Г.* Шліфування і доводка зносостійких антифрикційних композитних деталей друкарських машин: Монографія.-ч. 1.- К.: Видавничий дім „АртЕк”, 2017.-208 с.

53. Практичне проектування і конструювання деталей машин: навчальний посібник / В. О. Малащенко, В. М. Стрілець, М. М. Козяр, О. Р. Стрілець;

Міністерство освіти і науки України, Національний університет водного господарства та природокористування. — Рівне: НУВГП, 2020. — 145 с.

54. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні вимоги. Чинний від 2016-04-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 21 с.

55. ДСТУ 3833-98. Прутки, штаби та мотки з інструментальної нелегованої сталі. Загальні технічні умови. Чинний від 2001-01-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2001. 25 с.

56. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови. Чинний від 2016-04-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 46 с.

57. *Гавенко С.* Принципи моделювання технічних систем у поліграфії / С. Гавенко, С. Гунько. — Львів : Компанія «Манускрипт», 1996. — 133 с.

58. *Величко О. М.* Опрацювання інформаційного потоку взаємодією елементів друкарського контакту : монографія. / О. М. Величко — Київ : Видав.-полігр. центр «Київський університет», 2005. — 264 с.

59. *Гавенко С.* Стандарти у видавничо-поліграфічній галузі : навч. посіб. / С. Ф. Гавенко, О. В. Мельников. — Львів : УАД, 2006. — 132 с.

60. *Зигуля С. М.* Параметрична система технологічного процесу двобічного друкування / С. М. Зигуля // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». — 2015. — № 1. — С. 36–43.

61. *Jakucewicz S.* Bledy w drukowaniu offsetowym a wady papieru / S. Jakucewicz : monografia. — Warszawa : Adamantan, 2010. — 160 s. Wlasnosci papieru i kartonu pod katem lakierowania // Swiat Druku. — 2010. — № 1. — с. 73–75.

62. *Назар І. М.* Параметри відбитків рулонного офсетного друку: фактори управління і впливу : монографія / І. М. Назар, Е. Т. Лазаренко, С. Якуцевич. — Львів : УАД, 2009. — 128 с.

63. *Поліграфічні матеріали* / під ред. Е. Т. Лазаренка. — Львів: Афіша, 2001. — 328 с.

64. *Гавенко, С. Ф., Бернацек, В. В., Лабецька, М. Т.* (2021). Дослідження впливу типу зволожувальних систем в офсетному друці на якість відбитків. Технологія і техніка друкарства, (2(72), 20–28. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(72\).2021.241544](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(72).2021.241544)

65. Якуцевич С. Оцінка якості відбитків аркушевого офсетного друку / С. Якуцевич // Друкарство. – 2006. – № 6. – С. 14–16.
66. Григор'єва Н. С. Забезпечення та підвищення експлуатаційних властивостей деталей та з'єднань / Н. С. Григор'єва, В. А. Шабайкович // Вісн. ЖДТУ. – 2006. – № 4. – С. 124–135.
67. Підвищення надійності деталей і вузлів поліграфічного та металообробного технологічного обладнання : звіт про наук.-дослід. роботу / НТУУ «КПІ» ; П. О. Киричок. – Тема № 2992–Ф ; КВНТДІ.2–11.02.08 ; 0106U007487: – Київ : 2007р. – 232 с.
68. Несхозиєвська Т. М. (2013). Теоретичні моделі технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей деталей аркушепровідних систем офсетних друкарських машин. Технологія і техніка друкарства, (3(41), 12–17. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(41\).2013.23475](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(41).2013.23475)
69. Лотоцька О. І. Теоретичні розрахунки опорної площі на циліндричних поверхнях деталей поліграфічного обладнання / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 2. – С. 66–72.
70. Киричок П. О. Зміцнення поверхонь металевих деталей : навч. посіб. / П. О. Киричок, В. Г. Олійник, Т. Ю. Киричок. – К. : Преса України, 2004. – 240 с.
71. Киричок, П. О., Тріщук, Р. Л., Рибак, О. В. (2018). Розрахунки відносної опорної площі циліндричних поверхонь деталей поліграфічного обладнання при комбінованому зміцненні віброобкатуванням. Технологія і техніка друкарства, (3(61), 4–13. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(61\).2018.155937](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(61).2018.155937)
72. Киричок П. О. Фінішне оброблення зносостійких деталей друкарських машин : навчальний посібник - 2-ге вид., перероб. та допов. / П. О. Киричок, А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк, В. Г. Олійник, — К. : АртЕк, 2018. — 407 с.
73. Афтаназів І. С., Гавриш А. П., Киричок П. О. та інші. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. — Житомир: ЖУТУ, 2001. — 516 с.
74. Несхозиєвський А. В. Розрахунок контактної площі деталей поліграфічного обладнання після нанесення мікрорельєфу / А. В. Несхозиєвський // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 1. – С. 120–123.

75. *Швайка Л. А.* Розвиток і регулювання видавничого підприємництва : монографія / Л. А. Швайка. – Л. : Укр. акад. друкарства, 2005. – 432 с.
76. *Хмілярчук О. І.* Комбіновані способи поверхневого пластичного деформування деталей поліграфічного обладнання / О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2006. – № 3. – С. 74–80.
77. *Киричок П. О.* Програмне забезпечення з розрахунку процесів оздоблювально-зміцнюючої обробки циліндричних поверхонь / П. О. Киричок, О. І. Хмілярчук // Технологія і техніка друкарства. – Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ, 2007. – №3–4. С. 80–85.
78. *Киричок П. О.* Керування технологічними процесами оздоблювально-зміцнюючої обробки деталей поліграфічного обладнання / П. О. Киричок, В. Г. Олійник // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». – 2007. – № 3–4. – С. 74–80.
79. *Киричок, Т. Ю., Баглай, В. А.* (2019). Система формування тиражостійкості форм інтаглідруку. Технологія і техніка друкарства, (3(65), 15–24. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(65\).2019.196565](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(65).2019.196565)
80. *Гордієнко А. І.* Математичне моделювання технологічних процесів у машинобудуванні : навч. посіб. / А. І. Гордієнко, Л. Г. Полянський, П. П. Мельничук, М. Л. Хейфець. – Житомир : Житомир. інж.-техн. ін-т, 2001. – 190 с.
81. *Володарський Є. Т.* Статична обробка даних : навч. посіб. / Є. Т. Володарський, Л. О. Кошева. – К. : НАУ, 2008. – 308 с.
82. *Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA* : навч. посіб. / В. С. Фетісов. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. – 114 с.
83. *Струтинський В. Б.* Математичне моделювання процесів та систем механіки : підручник / В. Б. Струтинський. – Житомир : Житомир. інженер.-техн. ін-т, 2001. – 612 с.
84. ДСТУ ISO 4287:2012 «Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT)» – Введ. 2013–03–01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2013. – 22 с.
85. *Душинський В. В.* Основи наукових досліджень. Теорія та практикум з програмним забезпеченням : навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.

86. *Радько О.В.* Оптимізація технологічних процесів формування захисних структур триботехнічного призначення // Проблеми тертя та зношування : Наук.-техн. зб. – Київ : Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2011. – Вип. 55. – С. 173–181.
87. *Ратушняк Г. С.* Планування багатофакторного експерименту для дослідження регулюючих пристроїв аеродинамічної мережі / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2012. – № 2. – С. 99–106.
88. *Радченко С. Г.* Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем : навч.-метод. посіб. / С. Г. Радченко. – Київ : Політехніка, 2002. – 88 с.
89. *Олійник В. Г.* Теоретичні дослідження утворення регулярних мікрорельєсів на металевих поверхнях / В. Г. Олійник, П. О. Киричок // Технологія і техніка друкарства / ВПФ НТУУ «КПІ». – 2003. – № 2. – С. 66–72.
90. *Тітов А. В.* Підвищення ефективності вигладжування різних конструкційних матеріалів за рахунок керування швидкісних і силових параметрів навантаження інструментів / А. В. Тітов // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київський політехн. ін-т». Сер. Машинобудування. – 2010. – № 59 – С. 121–125.
91. *Тітов В. А.* Деякі перспективні напрямки розвитку процесів вигладжування конструкційних матеріалів / В. А. Тітов, А. В. Тітов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2009. – № 32 : Нові рішення в сучасних технологіях. – С. 78–86.
92. *Герасимова О. В.,* Мозговий, О. В., & Тітов, А. (2018). АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ У ПРОЦЕСІ ВИГЛАДЖУВАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ CAD/CAE ANSYS. Матеріали науково-технічної конференції" Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта", (XIX).
93. *ANSYS Analysis Guide. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear structural analysis. 001087. 4th Edition. SAS IP.*
94. *Несхозиєвська Т. М.* Критерії оцінки працездатності, надійності та якості роботи аркушепровідних систем офсетних друкарських машин [Текст] / Т. М. Несхозиєвська, П. О. Киричок, М. А. Зенкін // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. - 2013. - № 1 (69). - С. 50-53.
95. *Гурей І. В.* Підвищення довговічності і напрямних технологічного обладнання фрикційним зміцненням / І. В. Гурей, Т. А. Гурей // Вісн. Нац. ун-ту

«Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Вид-во «Львівська політехніка», 2011. – № 702. – С. 19–24.

96. Харламов Ю. О. Класифікація деталей машин з обліком якості їх поверхневого шару.” *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля* (2022).

97. Назаров Ю. Ф. Методи дослідження і контролю шорсткості поверхні металів і сплавів / Ю. Ф. Назаров, А. М. Шкилько, В. В. Тихоненко, І. В. Компанєєц // *Фізична інженерія поверхні*. – Харків : Харк. нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна. – 2007 – Т. 5. – № 3 – 4. – С. 207–216.

98. Лотоцька О. І. Дослідження якості поверхонь циліндричних деталей поліграфічних машин при комплексній технології / О. І. Лотоцька // *Наук. нотатки – Луцьк : Луц. нац. техн. ун-т*. – 2013. – № 41–1. – С. 160–165.

99. ДСТУ 2413-94 «Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення» – Введ. 1995–01–01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 1995. – 22 с.

100. Катрук О. В. Визначення шорсткості поверхні тонкостінних деталей алюмінієвого сплаву / О. В. Катрук, О. А. Плівак, С. В. Майданюк // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. Севастополь, – 2012. – № 129. – С. 100–106.

101. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : навч. посіб. / І. С. Афтаназів [та ін.]. – Житомир : Житомир. інженер.-техн. ін-т, 2001. – 516 с.

102. Ступницький В. В. Узагальнений алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу. *Прогресивні технології і системи машинобудування*, 2014, 2: 109-120.

103. Аналіз технологій викінчувального оброблення відповідальних різевих деталей / І. С. Афтаназів, А. М. Кук, Я. М. Кусий, В. В. Вівчарик // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. — Львів : Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. — № 535 : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. — С. 95–104.

104. Кусий Я. М. Прогнозування технологічних параметрів вібраційно-відцентрованого зміцнення деталей із конструкційних матеріалів / Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький, О. Т. Велика // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2007. – № 583. – С. 3–11.
105. ISO 6506-1:2014 Metallic materials — Brinell hardness test — Part 1: Test method . Введ. 2014–10–01. 18 с.
106. ДСТУ 2999-75. «Метали і сплави. Метод вимірювання твердості за Віккерсом». – Введ. 1985–07–12. – М. : Изд-во стандартів, 1987. – 16 с.
107. ДСТУ 3668-97 «Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Визначення уявної твердості матеріалів в основному з рівномірною твердістю у перерізі» – Введ. 1997–07–01. – М. : Изд-во стандартів, 2001. – 7 с.
108. ДСТУ 3669-97 «Матеріали металеві спечені, крім твердих сплавів. Метод випробування на згинання ударом». – Введ. 1999–07–01. – М. : Изд-во стандартів, 2001. – 8 с.
109. Роїк Т. А. Функціонувальні покриття для деталей поліграфічної техніки / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». 2006. – № 1–2. – С. 121–127.
110. Роїк Т. А. Функціонувальні покриття для деталей поліграфічної техніки / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш // Технологія і техніка друкарства / ВПІ НТУУ «КПІ». 2006. – № 1–2. – С. 121–127.
111. Киричок П. О. Хмілярчук О. І. Комплексна оздоблювально-зміцнювальна обробка циліндричних деталей // Технологія і техніка друкарства. — 2005. — № 3(4). — С. 46—52.
112. ДСТУ ISO 286-1-2002 «Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок». – Чинний від 2003–10–01. – Київ : Держстандарт, 2002. – 15 с.]
113. Якість поверхонь зносостійких композитних деталей тертя поліграфічних машин при прецизійних доводках / А. П. Гавриш, Т. М. Роїк, П. О. Киричок, С. М. Зигуля та ін. // Вісн. Терноп. нац. техн. ун-ту. – 2014. – № 4. – С. 126–134.

114. *Роїк Т. А.* Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації : монографія / Т. А. Роїк, П. О. Киричок, А. П. Гавриш ; НТУУ «КПІ». – К., 2007. – 404 с.

115. ДСТУ 7787:2015 «Забезпечення зносостійкості виробів. Метод випробовування матеріалів на зношування під час фретингу та фретинг-корозії». Чинний від 2016-04-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 11 с.

116. *Величко О. М.* Вплив мікроструктури поверхні фарбових валиків на фарбоперенесення / О. М. Величко // Технологія і техніка друкарства. – Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ, 2003. – №2. – С. 42-48.