

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи матеріалів технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

**Аналіз зносостійкості та термостійкості
захисних покриттів на хромистих сталях /
Analysis of wear resistance and thermal
stability of protective coatings on chromium
steels**

132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Матеріалознавство

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМс-31
Ксендзик Софія Андріївна

(підпис)

Керівник:
д.т.н., професор
Єфременко Василь Георгійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
д.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03 ” січня _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ксендзик Софії Андріївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Аналіз зносостійкості та термостійкості захисних покриттів на хромистих сталях / Analysis of wear resistance and thermal stability of protective coatings on chromium steels*

керівник роботи *Єфременко Василь Георгійович, д.т.н., професор*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *31.12.25* року № *540/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« *23* » *травня* 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *Типові технологічні процеси нанесення покриттів креслення деталі; умови роботи штока; методичні вказівки; довідники; зразки зі сталі 40X13.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ; Розділ 1 Огляд технічної літератури; Розділ 2 Характеристика шнеку екструдера; Розділ 3 Технологія нанесення покриття; Розділ 4 Аналіз зносостійкості та теплостійкості покриття шнека Висновки; Список використаних джерел; Додатки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Титульна сторінка - 1 л. ф. А4, 2. Актуальність теми - 1 л. ф. А4,

3. Обґрунтування технології нанесення покриття - 1 л. ф. А4, 4. Характеристика об'єкту дослідження - 1 л. ф. А 4, 5. Схема режиму термічної обробки 40X13 - 1 л. ф. А4,

6. Схема технологічного процесу - 1 л. ф. А 4, 7. Доріжки тертя - 2 л. ф. А4,

8. Порівняння втрати маси зразків після випробувань - 1 л. ф. А4,

9. Висновки - 1 л. ф. А4,

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>	<i>03.01.26</i>	<i>23.05.2026</i>

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ, Розділ 1 Огляд технічної літератури.</i>	<i>05.05.26</i>	
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Характеристика шнеку екструдера.</i>	<i>12.05.26</i>	
	<i>Розділ 3 Дослідна частина.</i>		
<i>3</i>	<i>Розділ 4 Технологія нанесення покриття</i>	<i>19.05.26</i>	
	<i>Висновки. Графічна частина.</i>		

Здобувач вищої освіти _____ *Ксендзик С.А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Єфременко В.Г*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ксендзик С. А. Назва теми: «Аналіз зносостійкості та термостійкості захисних покриттів на хромистих сталях / Analysis of wear resistance and thermal stability of protective coatings on chromium steels»

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, додатків.

У кваліфікаційній роботі аналіз матеріалу шнека для харчової промисловості, проаналізовано та обґрунтовано вибір покриття; матеріалу покриття; проаналізовано особливості абразивного зношування шнека та вплив тертя на зносостійкість.

Основні рішення, прийняті в роботі направлені на вивчення впливу нанесених покриттів на абразивне зношування шнека.

Загальний обсяг роботи: 42 сторінки, 4 розділи та висновки, 15 рисунків, 6 таблиць, 18 літературних джерел.

Ключові слова: хромиста сталь 40X13, зношування, доріжки тертя, PVD-покриття.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Ксендзик			Аналіз зносостійкості та термостійкості захисних покриттів на хромистих сталях / Analysis of wear resistance and thermal stability of protective coatings on chromium steels			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірив		Єфременко								3	42
								ЛНТУ, каф.матеріалознавства, гр. ПМс-31			
Н. Контр		Мисковець									
Затв.		Імбірович									

ABSTRACTS

Ksendzyk S. A. Thesis Title: “Analysis of Wear Resistance and Thermal Stability of Protective Coatings on Chromium Steels”

Bachelor’s thesis in the educational program “Materials Science,” specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor’s thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a bibliography, and appendices.

The thesis analyzes the material of a screw conveyor for the food industry, examines and justifies the choice of coating and coating material, and analyzes the characteristics of abrasive wear of the screw conveyor and the effect of friction on wear resistance.

The main solutions adopted in the thesis are aimed at studying the effect of applied coatings on the abrasive wear of the screw conveyor.

Total volume of the thesis: 42 pages, 4 chapters and conclusions, 15 figures, 6 tables, 18 references.

Keywords: 40X13 chromium steel, wear, friction tracks, PVD coating.

					БП 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	8
1.1. Хромисті сталі, їх склад, структура та властивості	8
1.2. Класифікація та методи нанесення захисних покриттів	11
1.3. Формування структури та властивостей покриттів	13
1.4. Мікроструктура і фазовий склад покриттів	14
1.5. Зносостійкість та термостійкість покриттів	15
1.6. Висновки та постановка завдань	18
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА	20
2.1. Об'єкт дослідження	20
2.2. Вимоги до матеріалу та поверхневого шару шнека	22
2.3. Характеристика сталі шнека	23
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ	26
3.1. Технологічний процес нанесення CrN-покриття	26
3.2. Створення хромової підкладки	29
3.3. Очищення аргоном	31
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ТЕПЛОСТІЙКОСТІ ПОКРИТТЯ ШНЕКУ	33
4.1. Аналіз абразивного зношування шнека	33
4.2. Оцінка втрати маси після абразивного тертя	34
4.3. Характеристика теплостійкості	35
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Однією з ключових проблем експлуатації металевих матеріалів, зокрема сталей, є їх схильність до зношування та термічної деградації, що призводить до передчасного виходу з ладу елементів конструкцій. Сучасна промисловість характеризується зростанням навантажень на матеріали та переходом до більш жорстких умов експлуатації (високі температури, швидкості, агресивні середовища), що вимагає підвищення зносостійкості деталей без значного збільшення їх вартості.

Згідно з сучасними дослідженнями, процеси зношування та корозії є причиною понад 80 % відмов механічних компонентів у промисловості, що обумовлює значні економічні втрати та потребу у вдосконаленні матеріалів і технологій їх захисту [1]. Особливо це актуально для деталей, що працюють в умовах комбінованого впливу механічного навантаження, високих температур і агресивних середовищ.

Хромисті сталі широко застосовуються у різних галузях техніки завдяки їх високій міцності, корозійній стійкості та здатності до зміцнення. Вміст хрому забезпечує формування стабільних карбідних фаз та оксидних плівок, що підвищують стійкість матеріалу до окиснення і зношування [2]. Однак навіть ці сталі за умов інтенсивної експлуатації не завжди забезпечують необхідний рівень зносо- та термостійкості, що обмежує їх ресурс роботи.

Ефективним напрямом підвищення експлуатаційних характеристик сталей є застосування захисних покриттів. Сучасні покриття (нітридні, карбідні, композиційні, високоентропійні тощо) дозволяють істотно підвищити твердість, зносостійкість, термостійкість і корозійну стійкість поверхневого шару без зміни властивостей основного матеріалу. Використання покриттів може значно зменшити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування, що особливо важливо для деталей тертя [3].

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ефективність захисних покриттів визначається не лише їх складом, але й мікроструктурою, адгезією до підкладки, технологією нанесення та умовами експлуатації [4]. Важливим є також встановлення взаємозв'язку між структурою покриття та його експлуатаційними властивостями, зокрема зносостійкістю та термостійкістю.

Аналіз властивостей захисних покриттів на хромистих сталях, а також дослідження факторів, що впливають на їх ефективність, є важливим науково-практичним завданням сучасного матеріалознавства та інженерії поверхні. Активний розвиток технологій нанесення покриттів і створення нових матеріалів із покращеними трибологічними та термічними властивостями, включаючи багатошарові, наноструктуровані та композиційні покриття є досить актуальним для багатьох галузей промисловості. Тому мета кваліфікаційної роботи полягає в аналізі зносостійкості та термостійкості захисних покриттів на хромистих сталях, а також у встановленні взаємозв'язку між структурними характеристиками покриттів і їх експлуатаційними властивостями.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування тексту та для пошуку літератури виключно з метою уточнення формулювань, перевірки достовірності інформації у наукових публікаціях та опрацювання літературних джерел. Усі основні судження були прийняті автором роботи, а сама робота перевірена на достовірність згідно принципів академічної доброчесності на відсутність запозичень та генерованих ШІ результатів.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Хромисті сталі, їх склад, структура та властивості

Хромисті сталі становлять важливу групу конструкційних, корозійностійких, жаростійких і зносостійких матеріалів, основною легувальною ознакою яких є підвищений вміст хрому. Саме хром визначає здатність сталі до пасивації, підвищує опір окисненню, сприяє утворенню карбідних фаз і суттєво впливає на фазовий склад, твердість, міцність та експлуатаційну довговічність матеріалу. У сучасному матеріалознавстві хромисті сталі розглядають не лише як корозійностійкі матеріали, а й як перспективну основу для нанесення функціональних захисних покриттів, призначених для роботи в умовах тертя, нагрівання, окиснення та циклічних навантажень.

За структурною ознакою хромисті та хромонікелеві нержавіючі сталі традиційно поділяють на феритні, мартенситні, аустенітні [5].

Феритні хромисті сталі мають структуру на основі α -Fe з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою. Вони зазвичай містять підвищену кількість хрому, але порівняно невелику кількість вуглецю. Такі сталі характеризуються доброю корозійною стійкістю, задовільною жаростійкістю, але нижчою пластичністю та в'язкістю порівняно з аустенітними сталями.

Мартенситні хромисті сталі містять хром і підвищену кількість вуглецю, що забезпечує можливість гартування з утворенням мартенситної структури. Саме ця група є особливо важливою для деталей, що працюють в умовах тертя, ударних навантажень і зношування, оскільки після термічної обробки вони можуть мати високу твердість і міцність.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аустенітні сталі містять хром і достатню кількість аустенітоутворювальних елементів, насамперед нікелю, марганцю або азоту. Вони мають високу корозійну стійкість, пластичність і технологічність, однак їх зносостійкість без додаткового зміцнення поверхні часто є недостатньою для важких умов експлуатації (табл. 1).

Окрема група – сталі, що поєднують феритну й аустенітну фази, що забезпечує сприятливе поєднання міцності та корозійної стійкості. Для дуплексних сталей характерний підвищений вміст хрому, часто в межах приблизно 20...28 %, а також наявність нікелю, молібдену й азоту, які стабілізують фазовий склад і підвищують опір локальній корозії [6, 7].

Хром є одним із найважливіших легувальних елементів у сталях, оскільки одночасно впливає на фазову рівновагу, карбідоутворення, пасивацію поверхні та високотемпературну стабільність. З металознавчої точки зору хром належить до феритоутворювальних елементів, тобто розширює область існування α -фази та підвищує стабільність фериту. Водночас у сталях із підвищеним вмістом вуглецю хром активно взаємодіє з вуглецем, утворюючи карбіди типу M_7C_3 , $M_{23}C_6$ або складні леговані карбіди.

Таблиця 1.1 – Характеристика хромистих сталей

Клас сталі	Типова структура	Основні переваги	Обмеження при експлуатації
Феритна	α -ферит	Корозійна та жаростійкість	Нижча пластичність, обмежена зносостійкість
Мартенситна	Мартенсит + карбіди	Висока твердість, міцність, зносостійкість	Можлива крихкість, потреба у точній термообробці
Аустенітна	γ -аустеніт	Пластичність, в'язкість, корозійна стійкість	Недостатня твердість для вузлів тертя
З подвійною структурою	Ферит + аустеніт	Поєднання міцності й корозійної стійкості	Чутливість до фазових перетворень при нагріванні

Саме карбіди хрому відіграють ключову роль у формуванні зносостійкості. Вони мають високу твердість і здатні перешкоджати

мікрорізанню, пластичній деформації та руйнуванню поверхневого шару під час тертя. У сучасних дослідженнях високохромистих сплавів підкреслюється, що не лише кількість, але й розмір, морфологія та рівномірність розподілу карбідів істотно впливають на твердість і зносостійкість матеріалу [8]. Надмірна кількість карбідів або їх нерівномірний розподіл можуть знижувати ударну в'язкість, сприяти крихкому руйнуванню та утворенню тріщин. Для хромистих сталей важливим є досягнення балансу між твердістю, міцністю, пластичністю та тріщиностійкістю [9].

Механічні властивості хромистих сталей залежать від їх структурного класу, вмісту вуглецю, кількості хрому, режиму термічної обробки та наявності додаткових легувальних елементів. Для мартенситних хромистих сталей характерні висока міцність і твердість після гартування та відпуску. Це робить їх придатними для виготовлення деталей тертя, ріжучого інструменту, клапанів, валів, підшипникових елементів, штампового оснащення та деталей енергетичного обладнання. Феритні сталі поступаються мартенситним за твердістю, однак мають кращу стабільність структури при нагріванні та добру стійкість до окиснення. Аустенітні сталі відзначаються високою пластичністю, ударною в'язкістю і корозійною стійкістю, але їх низька твердість часто обмежує використання у вузлах інтенсивного тертя без додаткового поверхневого зміцнення. Подвійні сталі займають проміжне положення, поєднуючи міцність феритної складової та корозійну стійкість аустенітної складової (таблиця 1.1).

На рисунку 1.1 приведено схему, яка описує умови роботи та причини руйнування хромистих сталей.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Основні механізми втрати працездатності хромистих сталей

Хромисті сталі є важливою групою матеріалів для деталей, що працюють в умовах механічного навантаження, корозії, тертя та підвищених температур. Їх властивості визначаються насамперед вмістом хрому, кількістю вуглецю, структурним класом, режимом термічної обробки та характером карбідної фази. Хром забезпечує формування пасивної плівки Cr_2O_3 , підвищує жаростійкість і сприяє утворенню твердих карбідів, однак не усуває повністю проблеми зношування, крихкого руйнування та термічної деградації поверхні.

1.2. Класифікація та методи нанесення захисних покриттів

Захисні покриття є одним із найбільш ефективних способів підвищення експлуатаційних характеристик металевих матеріалів без зміни їх об'ємних властивостей. Покриття розглядаються як функціональні поверхневі системи, які формують бар'єр між матеріалом основи та зовнішнім середовищем, забезпечуючи підвищення зносостійкості, корозійної та термічної стійкості. Для хромистих сталей застосування покриттів особливо доцільне, оскільки

дозволяє поєднати високу міцність і технологічність основи з покращеними трибологічними та високотемпературними властивостями поверхневого шару.

Покриття класифікують за кількома основними ознаками: за хімічним складом, способом нанесення та функціональним призначенням. За хімічним складом виділяють:

- металеві покриття;
- оксидні покриття;
- нітридні (CrN, TiN, AlCrN);
- карбідні (WC, Cr₃C₂);
- боридні;
- композиційні та багат шарові покриття.

Нітридні та карбідні покриття є найбільш ефективними для підвищення зносостійкості та термостійкості [10].

За функціональним призначенням покриття поділяють на:

- зносостійкі;
- термостійкі;
- корозійностійкі;
- теплозахисні;
- антифрикційні.

Газотермічні методи (плазмове напилення, детонаційне напилення) базуються на нагріванні та прискоренні частинок матеріалу до високих швидкостей із подальшим їх осадженням на поверхню (табл. 1.2, рис.1.2).



Рисунок 1.2 – Схема нанесення покриття

Вакуумні методи нанесення покриттів забезпечують формування тонких, щільних і високоякісних шарів із контрольованою структурою.

Методи фізичного осадження з парової фази (дугове, магнетронне напилення) широко використовуються для створення нітридних покриттів, такі покриття мають високу термостійкість і зберігають твердість при температурах понад 800 °С [10].

Таблиця 1.2 – Порівняння різних методів нанесення покриттів.

Метод	Товщина	Адгезія	Термостійкість	Зносостійкість	Особливості
Газотермічний	висока	середня	висока	висока	пористість
Вакуумні (PVD)	мала	висока	дуже висока	дуже висока	тонкі шари
CVD	середня	висока	дуже висока	висока	високі температури
Хіміко-термічний	середня	дуже висока	висока	висока	дифузійний шар

Методи нанесення захисних покриттів дозволяють суттєво підвищити зносостійкість і термостійкість хромистих сталей. Найбільш перспективними для умов інтенсивного тертя та високих температур є вакуумні покриття (CrN, TiAlN, AlCrN) та дифузійні методи. Вибір конкретного методу визначається умовами експлуатації, вимогами до товщини покриття, адгезії, термічної стабільності та економічною доцільністю.

1.3. Формування структури та властивостей покриттів

Формування властивостей захисних покриттів на хромистих сталях визначається комплексом взаємопов'язаних чинників: хімічним складом покриття, способом нанесення, температурою процесу, енергією частинок, станом поверхні основи, товщиною шару, рівнем залишкових напружень та характером міжфазної взаємодії на межі «покриття – сталь». Сучасні дослідження показують, що ефективність покриттів на сталевих підкладках визначається не лише їх твердістю, а й адгезією, тріщиностійкістю, щільністю структури, фазовим складом і здатністю формувати захисні оксидні шари при високих температурах [1, 11].

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Адгезія є однією з ключових характеристик, що визначає працездатність покриття. Навіть покриття з високою твердістю та термостійкістю не забезпечить надійного захисту, якщо між ним і основою існує слабкий міжфазний зв'язок. У процесі експлуатації деталі покриття зазнає дії контактних навантажень, термічних напружень, циклічного нагрівання й охолодження, тому недостатня адгезія призводить до відшарування, розтріскування або локального викришування шару.

Для хромистих сталей адгезія покриття залежить від кількох чинників: чистоти й шорсткості поверхні, наявності оксидних плівок, мікротвердості основи, різниці коефіцієнтів термічного розширення між покриттям і сталлю, а також від технології нанесення. У вакуумних PVD-процесах важливу роль відіграє іонне очищення поверхні перед осадженням, а також використання проміжних адгезійних шарів, наприклад Cr, Ti або CrN. Для покриттів типу CrN, TiN, TiAlN, AlCrN характерним є формування тонкого, щільного шару з високою твердістю. Однак через різницю в пружних і термічних властивостях покриття й основи на межі контакту можуть виникати залишкові напруження. Якщо ці напруження перевищують міцність міжфазного зв'язку, покриття втрачає суцільність. Передбачають використання багат шарових, градієнтних або нанокомпозиційних покриттів, які зменшують концентрацію напружень і підвищують адгезійну міцність. Інколи багат шаровість є одним із перспективних шляхів оптимізації механічних, трибологічних і високотемпературних властивостей покриттів [12].

1.4. Мікроструктура і фазовий склад покриттів

Мікроструктура покриття визначає його твердість, зносостійкість, тріщиностійкість, термостабільність і здатність протидіяти окисненню. Для

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захисних покриттів на хромистих сталях найбільше значення мають такі структурні характеристики:

- розмір зерен;
- щільність покриття;
- пористість;
- товщина шару;
- колоновидна структура;
- фазовий склад;
- залишкові напруження;
- якість межі «покриття-основа».

Для вакуумних покриттів характерною є щільна або колоновидна структура, яка формується внаслідок осадження атомів, іонів або кластерів на поверхні підкладки. При недостатній енергії частинок може формуватися пориста колоновидна структура, що знижує корозійну й термічну стійкість. За оптимальних параметрів осадження структура стає більш щільною, дрібнозернистою і рівномірною, що позитивно впливає на зносостійкість.

Фазовий склад покриття визначається хімічним складом, температурою осадження, тиском реакційного газу, енергією іонів і швидкістю охолодження.

1.5. Зносостійкість та термостійкість покриттів

У сучасному машинобудуванні, авіаційній техніці, енергетичному обладнанні та металургії поверхневі покриття є одним із найбільш ефективних засобів підвищення довговічності деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, абразивного зношування та високотемпературного навантаження. Відмови механічних систем пов'язані саме із процесами зношування поверхневих шарів, що зумовлює необхідність створення

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціональних покриттів із високою твердістю, стабільною мікроструктурою та стійкістю до окиснення при підвищених температурах.

Зносостійкість покриття характеризує його здатність чинити опір руйнуванню поверхневого шару в умовах механічного контакту. Для кількісної оцінки застосовують такі параметри:

- коефіцієнт тертя, μ ;
- інтенсивність зношування;
- об'ємний знос, мм^3 ;
- питомий коефіцієнт зношування, $\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$;
- мікротвердість та нанотвердість;
- критичне навантаження руйнування покриття.

Інтенсивність зношування прямо пов'язана з навантаженням і обернено пропорційна твердості матеріалу, тому збільшення твердості покриття зазвичай супроводжується підвищенням його зносостійкості. Покриття на основі нітридів титану, хрому, карбідів та багатокомпонентних систем мають твердість понад 25...40 ГПа, що суттєво перевищує характеристики конструкційних сталей. У процесі експлуатації поверхневі шари можуть руйнуватися за механізмами абразивного, адгезійного, втомного, окислювального видів зношування. Абразивне зношування виникає внаслідок дії твердих частинок або мікронерівностей, що призводить до мікрорізання поверхні. Для підвищення опору абразивному зношуванню застосовують покриття з карбідними та нітридними фазами. Адгезійне зношування пов'язане з локальним схоплюванням контактуючих поверхонь та подальшим відривом частинок матеріалу. Втомне зношування розвивається при циклічному навантаженні через накопичення мікродефектів, формування тріщин та відшарування покриття. Окислювальне зношування проявляється при підвищених температурах, коли на поверхні утворюються оксидні плівки, здатні як захищати, так і прискорювати руйнування залежно від їх структури та адгезії.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Термостійкість покриттів визначає здатність покриття зберігати фазовий склад, мікроструктуру, механічні властивості та адгезійну міцність при тривалому впливі високих температур. Основними критеріями термостійкості може стати температура початку окислення, жаростійкість, стабільність фазового складу, опір термоциклічному руйнуванню, стійкість до термічного розтріскування.

Особливо високі показники демонструють керамічні нітридні та карбідні покриття. Такі системи зберігають структурну стабільність при температурах 500...1000 °С залежно від складу.

Багатошарові покриття дозволяють забезпечити:

- високу поверхневу твердість;
- достатню в'язкість руйнування;
- зниження внутрішніх напружень;
- покращену адгезію до основи [1].

Таблиця 1.2 – Методи нанесення покриттів

Метод нанесення	Характерні особливості	Робочі температури
Вакуумне покриття	висока твердість, низька пористість	до 600...800 °С
PVD осадження	висока адгезія, рівномірність	до 1000 °С
Плазмове напилення	товсті покриття, термобар'єрний ефект	понад 1200 °С
Лазерне наплавлення	металургійний зв'язок з основою	до 900 °С

Комбінація багатошарової будови та нанорозмірного зміцнення забезпечує максимальне підвищення ресурсу деталей у 3...8 разів залежно від умов експлуатації [13].

1.6. Висновки та постановка завдань

Для шнека екструдера, який працює в умовах інтенсивного тертя, дії абразивних частинок, вологи та локального нагрівання, важливим є забезпечення високої зносостійкості, теплостійкості та стабільності поверхневого шару. Незважаючи на те, що сталь 40X13 після гартування та відпуску характеризується достатньо високою твердістю та корозійною стійкістю, у процесі експлуатації її поверхня зазнає поступового руйнування внаслідок абразивного й адгезійного зношування. Це призводить до збільшення шорсткості поверхні, погіршення умов транспортування продукту та зниження ресурсу обладнання.

Застосування PVD CrN-покриття є доцільним способом підвищення експлуатаційної довговічності шнека, оскільки дане покриття поєднує високу твердість, корозійну стійкість і термічну стабільність. Нітрид хрому характеризується високою мікротвердістю, що забезпечує ефективний опір мікрорізанню та пластичній деформації поверхні під дією абразивних частинок. Щільна структура CrN-покриття знижує інтенсивність руйнування поверхневого шару та сприяє зменшенню втрати маси при терті.

Важливою перевагою CrN є його висока теплостійкість. Покриття здатне зберігати структуру та твердість при локальному нагріванні, яке виникає в зоні контакту під час роботи шнека. На відміну від багатьох інших зміцнювальних покриттів, CrN характеризується високою стійкістю до окиснення та не втрачає захисних властивостей при циклічному термічному навантаженні.

Для деталей харчового обладнання суттєве значення має також корозійна стійкість покриття. PVD CrN-покриття має низьку пористість і хімічну стабільність у вологих та слабокислих середовищах, що забезпечує додатковий захист поверхні сталі 40X13 від корозійно-механічного

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

руйнування [14]. Крім того, CrN-покриття є хімічно інертним і придатним для використання у харчовій промисловості.

Додатковою перевагою PVD-технології є можливість формування тонких рівномірних покриттів із високою адгезією до хромистих сталей. Використання хромового підшару та іонного очищення поверхні аргонном забезпечує міцний міжфазний зв'язок між основою та покриттям, що суттєво знижує ризик відшарування CrN-шару в умовах циклічного навантаження.

Таким чином, вибір PVD CrN-покриття для шнека екструдера зі сталі 40X13 є технологічно та експлуатаційно обґрунтованим, оскільки таке покриття забезпечує комплексне підвищення зносостійкості, теплостійкості та стабільності поверхневого шару в умовах роботи харчового обладнання.

Метою роботи є аналіз впливу PVD CrN-покриття на зносостійкість і теплостійкість шнека екструдера для виробництва макаронних виробів зі сталі 40X13, а також оцінювання ефективності застосування вакуумного покриття для підвищення довговічності деталей харчового обладнання, що працюють в умовах абразивного тертя та локального нагрівання.

Об'єкт дослідження – процеси зношування та термічної деградації поверхневих шарів хромистих сталей із захисними покриттями. Предмет дослідження – адгезійні властивості та експлуатаційні характеристики (зносостійкість і термостійкість) захисних покриттів, нанесених на хромисті сталі.

Для реалізації мети було поставлено наступні завдання:

- Проаналізувати сучасний стан проблеми підвищення зносостійкості та термостійкості хромистих сталей.
- Розглянути механізми зношування матеріалів і фактори, що впливають на інтенсивність зносу.
- Провести оцінку обраних покриттів у заданих умовах тертя.
- Дослідити термостійкість покриттів після тертя, зважаючи на загальний стан покриття.
- Сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення довговічності хромистих сталей шляхом застосування захисних покриттів.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА

2.1. Об'єкт дослідження

У сучасній харчовій промисловості шнекові механізми широко застосовуються у складі транспортуючих, дозувальних, змішувальних та екструзійних систем. Їх використовують у м'ясопереробному, зернопереробному, кондитерському, хлібопекарському та фасувальному обладнанні для безперервного переміщення, подрібнення або ущільнення сировини. Шнеки забезпечують стабільність технологічного процесу, рівномірність подачі матеріалу та ефективність роботи обладнання, однак при цьому працюють в умовах інтенсивного механічного та корозійного навантаження (рисунок 2.1) [15].



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд шнека

Для виготовлення шнеків харчового обладнання найчастіше використовують корозійностійкі хромисті сталі мартенситного або ферито-мартенситного класу, зокрема 20X13, 30X13, 40X13, AISI 410 та аналогічні матеріали. Такі сталі поєднують достатню міцність, здатність до термічного

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зміцнення та корозійну стійкість у вологих середовищах. Водночас експлуатація шнеків у контакті з агресивними продуктами, мийними розчинами та абразивними частинками супроводжується прискореним руйнуванням поверхневих шарів, що обумовлює необхідність застосування захисних покриттів.

Особливістю роботи шнекових механізмів є одночасна дія кількох факторів:

- абразивного зношування;
- контактного тертя;
- циклічного навантаження;
- підвищеної вологості;
- корозійно-активних середовищ;
- локального нагрівання.

Під час транспортування сипких або в'язких продуктів між поверхнею шнека та робочим середовищем виникає інтенсивне тертя ковзання (рисунок 2.2). Найбільших навантажень зазнають крайки витків, зовнішня поверхня спіралі, зона завантаження, ділянки контакту з корпусом.

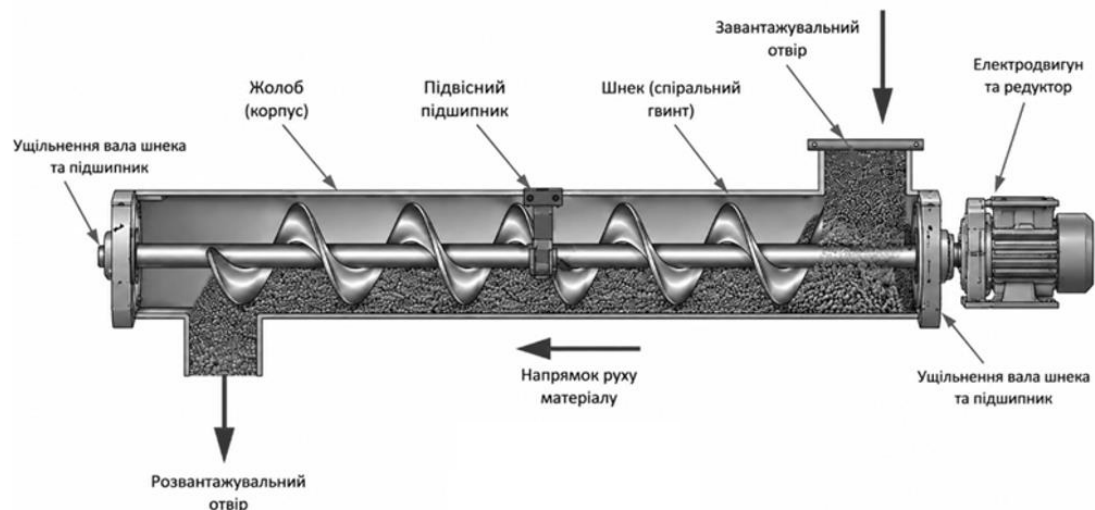


Рисунок 2.2 – Схема шнека

При транспортуванні цукру, солі, зернових сумішей, спецій або гранульованих продуктів спостерігається абразивне руйнування поверхні внаслідок дії твердих частинок. У вологих або кислих середовищах додатково активізуються корозійні процеси, що прискорюють деградацію поверхневого шару.

У харчовому обладнанні поверхня шнека регулярно контактує з водою, органічними кислотами, мийними засобами, дезінфекційними розчинами, паровими середовищами.

Особливо агресивними є хлорвмісні мийні засоби, здатні руйнувати пасивну плівку на поверхні сталі та ініціювати локальну корозію. В умовах циклічного нагрівання й охолодження виникають додаткові термічні напруження, які можуть спричиняти утворення мікротріщин і поступове руйнування поверхневих шарів.

2.2. Вимоги до матеріалу та поверхневого шару шнека

Для забезпечення довговічної роботи шнека матеріал та поверхнєве покриття повинні забезпечувати:

- високу твердість;
- стійкість до абразивного зношування;
- корозійну стійкість;
- стабільність властивостей при нагріванні;
- низький коефіцієнт тертя;
- хорошу адгезію покриття до основи;
- санітарну безпечність поверхні.

У сучасному матеріалознавстві ефективним способом підвищення ресурсу шнеків є використання вакуумних PVD-покриттів, які формують щільний поверхневий шар із високою твердістю та низькою пористістю.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш перспективними для хромистих сталей вважаються покриття на основі нітридів хрому та багатокомпонентних нітридних систем, здатних одночасно забезпечувати високу зносостійкість і термічну стабільність.

З урахуванням умов роботи шнека найбільш доцільним є використання PVD CrN-покриття, яке поєднує високу твердість, термостійкість та хорошу адгезію до хромистих сталей.

Покриття CrN характеризуються високою структурною щільністю, стійкістю до окиснення та здатністю зберігати твердість при температурах до 600...700 °C. Важливою перевагою CrN є також його придатність для деталей харчового обладнання, оскільки такі покриття є хімічно стабільними та мають хороші санітарно-гігієнічні властивості.

PVD CrN-покриття є тонким функціональним шаром на основі нітриду хрому, сформованим методом фізичного осадження з парової фази у вакуумному середовищі. Покриття характеризується високою твердістю, низьким коефіцієнтом тертя, значною термостійкістю та високою корозійною стійкістю, що забезпечує ефективне підвищення довговічності деталей харчового обладнання, які працюють в умовах інтенсивного зношування та дії агресивних середовищ [16].

2.3. Характеристика сталі шнека

Сталь 40X13 належить до мартенситних корозійностійких хромистих сталей та широко застосовується для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя, підвищеного механічного навантаження, дії вологи та помірно агресивних середовищ [17]. Відповідно до класифікації конструкційних нержавіючих сталей, 40X13 є високо-хромистою сталлю з підвищеним вмістом вуглецю, що забезпечує можливість ефективного термічного зміцнення з утворенням мартенситної структури.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними легувальними елементами сталі є хром і вуглець. Вміст хрому, як правило, становить близько 12...14 %, що забезпечує формування на поверхні пасивної оксидної плівки Cr_2O_3 та підвищує корозійну стійкість матеріалу. Вуглець у межах 0,36...0,45 % сприяє утворенню мартенситу та карбідів хрому після термічної обробки, що істотно підвищує твердість і зносостійкість сталі.

У відпаленому стані структура сталі складається переважно з ферито-карбідної суміші, що забезпечує добру оброблюваність різанням (рисунок 2.3) Після гартування з температур 1000...1050 °C та низького відпуску формується мартенситна структура з дисперсними карбідами хрому, яка характеризується високою твердістю, міцністю та достатньою корозійною стійкістю.

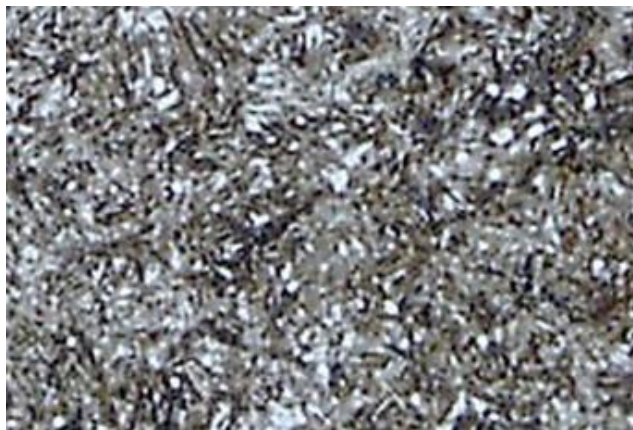


Рисунок 2.3 – Мікроструктура сталі
40X13 після термообробки

Твердість сталі після термічної обробки може досягати 48...56 HRC залежно від режиму гартування та температури відпуску. Саме поєднання високої твердості й корозійної стійкості забезпечує широке застосування сталі 40X13 для виготовлення:

- сталей насосного обладнання;
- клапанів;
- валів;
- ріжучого інструменту;

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- медичного інструменту;
- деталей харчового обладнання;
- шнеків та елементів транспортерів.

Мікроструктура сталі 40X13 після гартування характеризується формуванням голчастого мартенситу з дисперсними карбідами хрому та незначною кількістю залишкового аустеніту. Спостерігається пакетна будова мартенситної структури та рівномірний розподіл карбідної фази. Сформована структура забезпечує високу твердість і зносостійкість сталі, що є важливим для деталей харчового обладнання, які працюють в умовах інтенсивного тертя та абразивного навантаження.

Ефективним способом підвищення довговічності деталей зі сталі 40X13 є застосування функціональних захисних покриттів, зокрема PVD-покриттів типу CrN, які забезпечують додаткове підвищення зносостійкості, термостійкості та стабільності поверхневого шару в умовах інтенсивної експлуатації.

Для досліджуваного шнека екструдера для виробництва макаронних виробів сталь 40X13 є доцільним вибором матеріалу основи.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ

3.1. Технологічний процес нанесення CrN-покриття

Механізм формування PVD CrN-покриття базується на процесах фізичного осадження матеріалу з парової фази у вакуумному середовищі. У процесі нанесення покриття в робочій камері створюється понижений тиск, що забезпечує стабільність плазмового розряду та мінімізує взаємодію осаджуваних частинок із молекулами повітря. Джерелом матеріалу покриття є хромовий катод, поверхня якого під дією електричного розряду або іонного бомбардування інтенсивно випаровується чи розпилюється.

Утворені атоми та іони хрому переміщуються у вакуумному просторі до поверхні деталі, яка виконує роль підкладки. Одночасно до робочої камери подається азот, який у зоні плазми переходить у високоактивний стан. Унаслідок взаємодії атомів хрому з активованим азотом відбувається синтез нітридної фази CrN. Сформовані частинки нітриду хрому осаджуються на поверхні деталі, поступово утворюючи тонкий щільний захисний шар.

Важливу роль у механізмі формування покриття відіграє попереднє іонне очищення поверхні підкладки. Іонне бомбардування забезпечує видалення оксидних плівок, забруднень та адсорбованих частинок, а також активує поверхню металу, що сприяє підвищенню адгезії покриття до основи. Під час осадження іони високої енергії додатково ущільнюють структуру покриття та знижують його пористість.

У процесі росту покриття формується дрібнозерниста або колоновидна структура нітриду хрому, характер якої визначається температурою підкладки, енергією іонів, тиском азоту та швидкістю осадження. За оптимальних технологічних параметрів утворюється щільне покриття з високою твердістю, низькою шорсткістю та значною термічною стабільністю.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сформований шар CrN характеризується високою адгезійною міцністю, стійкістю до абразивного зношування, окиснення та корозійного руйнування. Саме тому PVD CrN-покриття є ефективним засобом зміцнення деталей харчового обладнання, що працюють в умовах інтенсивного тертя, дії вологи та циклічного нагрівання.

Нанесення PVD CrN-покриття на шнек зі сталі 40X13 здійснюється після попереднього формування необхідних властивостей основи. Оскільки покриття має невелику товщину і не здатне компенсувати дефекти підкладки, якість підготовки поверхні є визначальною умовою його працездатності.

3.1.1. послідовність операцій технологічного процесу

Спочатку шнек піддають попередній механічній обробці, під час якої формують геометрію витків, робочих поверхонь і посадкових ділянок. Після цього проводять термічну обробку сталі 40X13, яка включає гартування та відпуск (рисунок 3.1). Метою цього етапу є отримання мартенситної структури з достатньою твердістю та несучою здатністю для подальшої роботи покриття в умовах тертя.

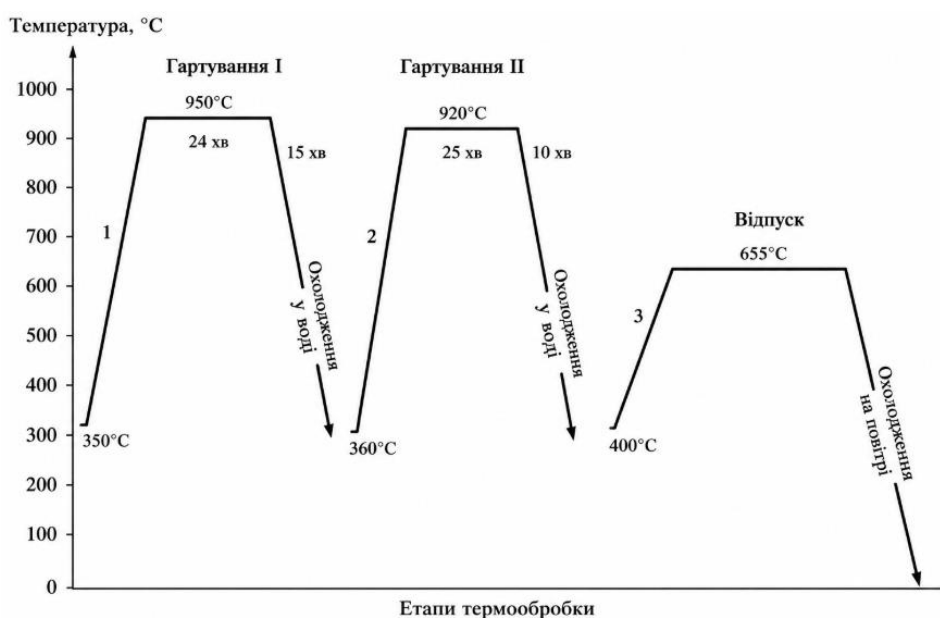


Рисунок 3.1 – Схема режиму термічної обробки 40X13

Після термічної обробки виконують фінішне шліфування та полірування робочої поверхні шнека. Цей етап необхідний для зниження шорсткості,

усунення поверхневих дефектів, окалини, задирок і слідів механічної обробки. Надмірна шорсткість може спричинити нерівномірне осадження покриття, локальні концентрації напружень і передчасне відшарування шару CrN.

Далі деталь очищують від технологічних забруднень. Знежирення проводять у лужних або органічних мийних середовищах, після чого поверхню промивають і висушують. Якісне очищення забезпечує видалення мастил, пилу, залишків абразиву та інших домішок, які можуть знижувати адгезію покриття до основи.

Підготовлений шнек розміщують у вакуумній камері установки PVD (рисунок 3.2). Після герметизації камери створюють робочий вакуум, необхідний для стабільного переміщення атомів і іонів хрому до поверхні деталі. Перед нанесенням покриття проводять іонне очищення, під час якого поверхня шнека бомбардується іонами інертного газу. Це дозволяє видалити тонкі оксидні плівки, активувати поверхню та покращити міжфазну взаємодію між основою і покриттям.

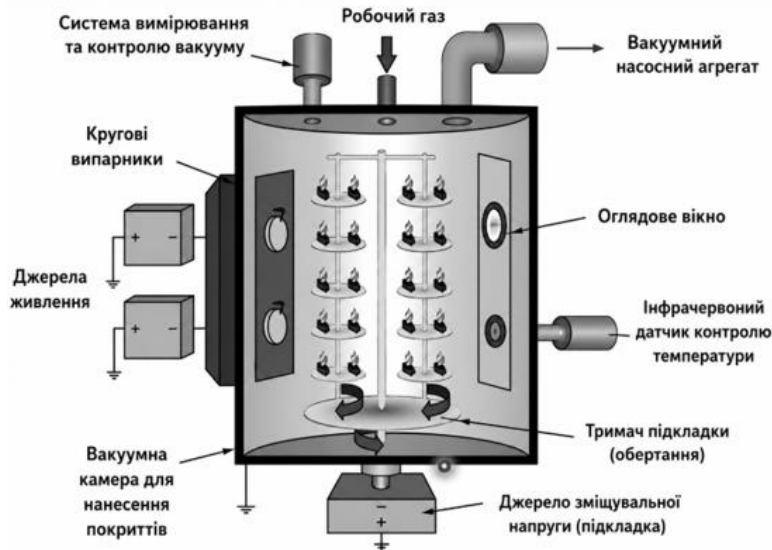


Рисунок 3.2 – Схема вакуумної камери

На наступному етапі здійснюють формування адгезійного підшару, найчастіше на основі хрому. Такий підшар забезпечує кращу сумісність між сталевою основою та нітридним покриттям, зменшує залишкові напруження і підвищує стійкість покриття до відшарування.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після цього у вакуумну камеру подають азот як реакційний газ. Хром, що випаровується або розпилюється з катода, взаємодіє з активованим азотом у плазмовому середовищі з утворенням нітриду хрому. Частинки CrN осаджуються на поверхні шнека, поступово формуючи тонкий щільний захисний шар (рисунк 3.3). Під час нанесення деталь обертається, що забезпечує більш рівномірне покриття складної гвинтової поверхні.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Механічна обробка	Термічна обробка	Фінішне шліфування і полірування	Знежирення, промивання та сушіння	Розміщення у вакуумній камері	Створення робочого вакууму	Іонне очищення поверхні	Формування адгезійного Cr-підшару	Осадження CrN-покриття	Охолодження деталі	Контроль якості покриття
Формування геометрії шнека, обробка поверхонь та посадкових ділянок.	Гартування та відпуск сталі 40X13 для отримання необхідної структури та твердості.	Зниження шорсткості, усунення дефектів поверхні, окислини та задирок.	Видалення мастил, забруднень, залишків абразиву та інших домішок. Промивання та сушіння деталі.	Установка шнека на тримачі у вакуумній камері PVD-установки та герметизація.	Відкачування повітря до необхідного тиску для стабільного процесу осадження.	Бомбардування іонами аргону для видалення оксидів, забруднень та активації поверхні.	Осадження тонкого шару хрому для покращення адгезії між основою та покриттям.	Подача азоту (N ₂) та осадження нітриду хрому (CrN) на поверхню деталі. Обертання забезпечує рівномірність покриття.	Охолодження шнека в камері або в контрольованій атмосфері до безпечної температури.	Перевірка товщини, адгезії, твердості, шорсткості та суцільності покриття.

Рисунок 3.3 – Схема технологічного процесу

Після досягнення необхідної товщини шару процес осадження припиняють, деталь охолоджують у вакуумній камері або в контрольованій атмосфері. Завершальним етапом є контроль якості покриття: оцінюють його зовнішній вигляд, суцільність, товщину, адгезію, шорсткість і твердість. За потреби проводять мікроструктурний аналіз, трибологічні випробування та оцінювання термостійкості.

Сформований шар CrN характеризується високою адгезійною міцністю, стійкістю до абразивного зношування, окиснення та корозійного руйнування. Саме тому PVD CrN-покриття є ефективним засобом зміцнення деталей харчового обладнання, що працюють в умовах інтенсивного тертя, дії вологи та циклічного нагрівання.

3.2. Створення хромової підкладки

Хромовий підшар у технології PVD CrN формується на початковій стадії вакуумного осадження і виконує функцію проміжного адгезійного шару між сталевою основою та основним нітридним покриттям. Його створення є

важливим етапом технології, оскільки безпосереднє осадження CrN на сталь може супроводжуватись виникненням значних залишкових напружень, локального відшарування та погіршенням міцності міжфазного контакту.

Після іонного очищення поверхні шнека у вакуумній камері активується хромовий катод. Під дією електричного розряду або іонного бомбардування атоми хрому вибиваються з поверхні катода та переходять у пароіонний стан. У цей момент подача азоту або ще не здійснюється, або його концентрація підтримується мінімальною. Завдяки цьому на поверхню деталі осаджується переважно чистий металевий хром.

Осадження хромового підшару відбувається у вакуумному середовищі при одночасному обертанні деталі, що забезпечує рівномірність шару на гвинтовій поверхні шнека. Під дією потоку іонізованих частинок атоми хрому інтенсивно взаємодіють із поверхнею сталі, частково проникаючи у приповерхневий шар основи. У результаті формується перехідна зона між сталлю 40X13 та майбутнім CrN-покриттям.

Такий підшар має невелику товщину, зазвичай у межах 0,1...0,5 мкм, однак він суттєво впливає на експлуатаційні властивості системи «основа—покриття». Наявність хромового проміжного шару сприяє:

- підвищенню адгезії;
- зменшенню внутрішніх напружень;
- покращенню рівномірності росту CrN;
- зниженню ризику відшарування покриття;
- підвищенню тріщиностійкості.

Після формування хромового підшару до вакуумної камери починають подавати азот. Хром, що продовжує випаровуватись із катода, взаємодіє з азотом у плазмовому середовищі, внаслідок чого на поверхні вже формується нітрид хрому CrN. Таким чином, хромовий підшар є перехідним елементом між сталеву основою та основним функціональним покриттям.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для деталей харчового обладнання використання Cr-підшару є особливо доцільним, оскільки він забезпечує стабільність покриття в умовах циклічного тертя, вологи, термічного навантаження та дії агресивних мийних середовищ.

3.3. Очищення аргоном

Очищення аргоном у технології PVD є етапом іонного очищення поверхні перед нанесенням покриття. Основною метою цього процесу є видалення оксидних плівок, адсорбованих газів, залишків мастил, вологи та мікрозабруднень із поверхні деталі для забезпечення високої адгезії покриття до основи.

Після розміщення шнека у вакуумній камері та створення необхідного рівня вакууму до робочого об'єму подають інертний газ – аргон. Аргон обирають через його хімічну інертність, оскільки він не вступає у реакцію з матеріалом основи та не змінює хімічний склад поверхні.

Під дією електричного поля у вакуумній камері формується плазмовий розряд, у якому атоми аргону іонізуються з утворенням позитивно заряджених іонів Ar^+ . Деталь при цьому підключається до негативного потенціалу, тому іони аргону прискорюються у напрямку поверхні шнека.

У результаті бомбардування поверхні високоенергетичними іонами аргону відбувається фізичне вибивання поверхневих забруднень та оксидних шарів. Такий процес називають іонним травленням або катодним очищенням. Одночасно з очищенням відбувається активація поверхні металу: підвищується її енергетичний стан, збільшується кількість активних центрів та покращуються умови для формування міжатомних зв'язків між сталлю і покриттям.

Іонне очищення аргоном також сприяє:

– зниженню товщини пасивної оксидної плівки;

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- покращенню змочування поверхні;
- вирівнюванню приповерхневого шару;
- зменшенню ймовірності пороутворення;
- підвищенню адгезійної міцності CrN-покриття.

Для сталі 40X13 цей етап є особливо важливим через наявність стійкої хромооксидної плівки Cr_2O_3 , яка природно формується на поверхні хромистих сталей. Без її часткового видалення нанесення PVD-покриття може супроводжуватись локальним відшаруванням та погіршенням експлуатаційних властивостей покриття.

Тривалість іонного очищення залежить від стану поверхні, геометрії деталі та параметрів установки, однак зазвичай становить 10...30 хв при пониженому тиску та підвищеній напрузі зміщення. Після завершення очищення поверхня залишається у вакуумному середовищі, що запобігає повторному окисненню перед осадженням хромового підшару та CrN-покриття.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

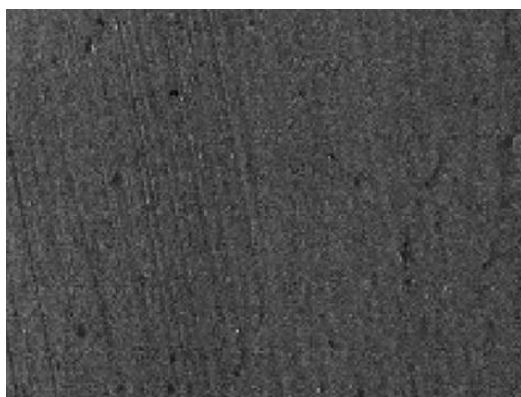
РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ТЕПЛОСТІЙКОСТІ ПОКРИТТЯ ШНЕКА

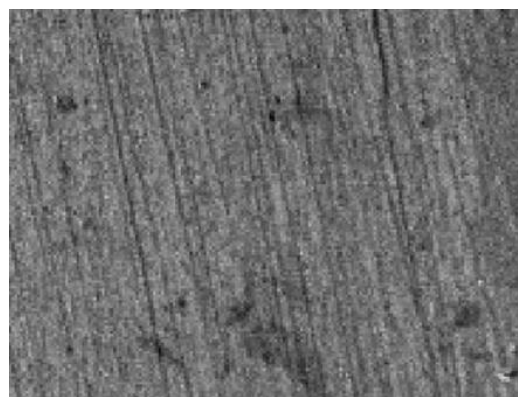
4.1. Аналіз абразивного зношування шнека

Випробування на абразивне зношування проводили з метою оцінювання стійкості PVD CrN-покриття до руйнування в умовах тертя твердими частинками. Дослідження виконували на машині тертя із використанням абразивного середовища при заданих навантаженні та швидкості ковзання. Після завершення випробувань визначали втрату маси, параметри доріжки зносу та характер поверхневих пошкоджень. Для встановлення механізмів руйнування поверхню досліджували методами металографічного та мікроскопічного аналізу [17].

Порівняння результатів для сталі 40X13 без покриття та з PVD CrN-покриттям дає змогу оцінити ефективність зміцнення поверхні та встановити вплив покриття на підвищення ресурсу деталей харчового обладнання (рисунки 4.1, 4.2).



а



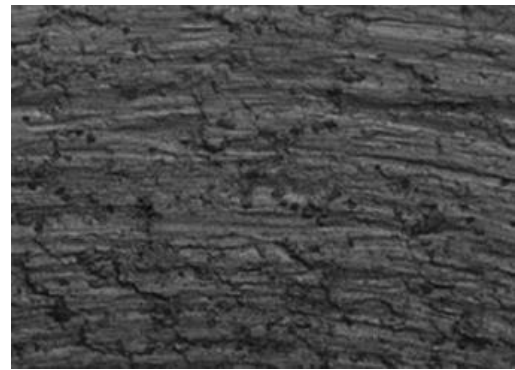
б

Рисунок 4.1 – Доріжки тертя зразка з покриттям CrN

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 4.2 – Доріжки тертя зразка без покриттям CrN

Аналіз доріжок зносу після абразивних випробувань показав, що поверхня сталі 40X13 без покриття характеризується інтенсивним мікрорізанням, пластичною деформацією та утворенням глибоких борозен. Для зразків із PVD CrN-покриттям спостерігається значно менша ширина доріжки зносу та більш рівномірний характер руйнування поверхні. Це свідчить про високу стійкість CrN-покриття до дії абразивних частинок та ефективне зниження інтенсивності зношування.

4.2. Оцінка втрати маси після абразивного тертя

Після проведення випробувань за чотирма режимами було проведено оцінку втрати маси зразків. Випробування проводили з навантаженням 10, 20, 30, 40 Н. Із збільшенням навантажень збільшували швидкість та тривалість тертя, що відображено у таблиці 4.1.

У таблиці наведено результати випробувань сталі 40X13 без покриття та з PVD CrN-покриттям при різних режимах абразивного тертя. Для кожного режиму проведено три повторних вимірювання втрати маси з подальшим визначенням середнього значення.

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням навантаження, швидкості ковзання та тривалості випробувань відбувається підвищення

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтенсивності зношування для всіх досліджуваних зразків. Найбільші значення втрати маси спостерігаються для незміцненої сталі 40X13 при максимальних параметрах тертя, що пов'язано з розвитком процесів мікрорізання, пластичної деформації та локального руйнування поверхневого шару.

Таблиця 4.1 – Втрата маси зразків після абразивного зношування

Зразок	Навантаження, Н	Швидкість ковзання, м/с	Час випробування, хв	Середня втрата маси, мг
без покриття	10	0,2	10	18,6
40X13 + CrN	10	0,2	10	4,2
без покриття	20	0,2	10	27,4
40X13 + CrN	20	0,2	10	6,8
без покриття	20	0,4	20	39,7
40X13 + CrN	20	0,4	20	9,5
без покриття	30	0,6	20	54,2
40X13 + CrN	30	0,6	20	12,7
без покриття	40	0,8	30	71,5
40X13 + CrN	40	0,8	30	16,9

Зразки з PVD CrN-покриттям характеризуються значно нижчими показниками втрати маси в усіх режимах випробувань. Це пояснюється високою твердістю та щільною структурою нітридного покриття, яке ефективно протидіє дії абразивних частинок та зменшує інтенсивність мікрорізання поверхні.

Отримані середні значення свідчать, що застосування PVD CrN-покриття дозволяє знизити втрату маси приблизно у 4...5 разів порівняно зі сталлю без покриття (рисунок 4.3), що підтверджує високу ефективність даного способу поверхневого зміцнення для деталей харчового обладнання.

4.3. Характеристика теплостійкості

Під час аналізу результатів абразивного зношування встановлено, що зразки зі сталі 40X13 без покриття характеризуються нижчою теплостійкістю порівняно зі зразками з PVD CrN-покриттям. У процесі тертя в зоні контакту

виникає локальний нагрів поверхні, який спричиняє підвищення пластичності поверхневого шару, інтенсифікацію окиснення та прискорення руйнування металу.

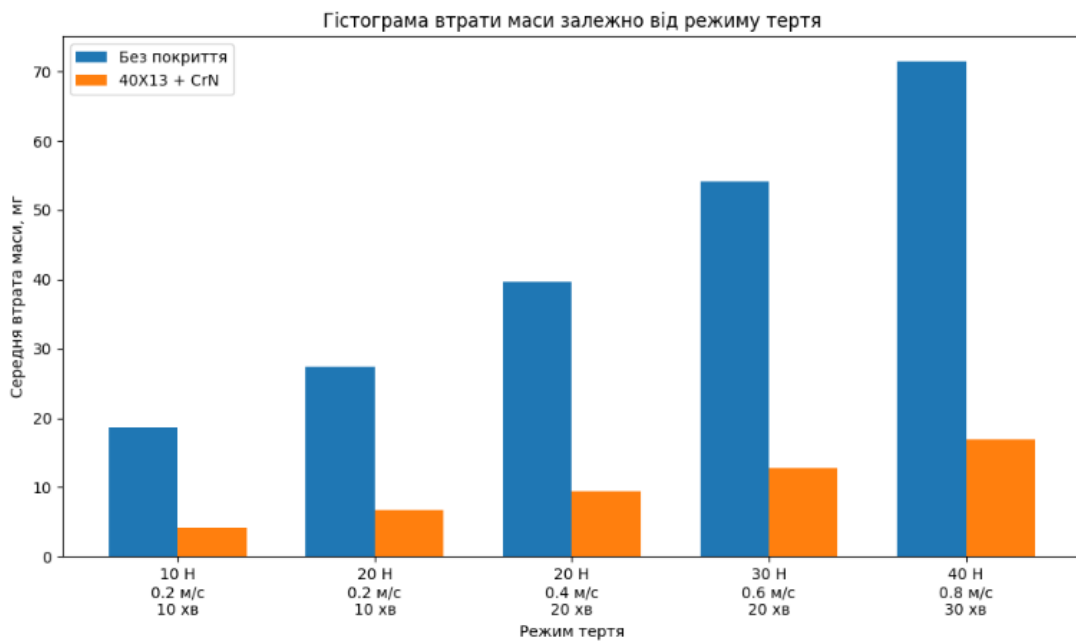


Рисунок 4.2 – Порівняння втрати маси зразків

Для незміцненої сталі це проявляється у формуванні широких доріжок зносу, локальному задиротворенні та розвитку пластичної деформації поверхні. Теплостійкість PVD CrN-покриття характеризує його здатність зберігати структуру, твердість, адгезію та захисні властивості після дії підвищених температур і тертя. Для деталей харчового обладнання це особливо важливо, оскільки під час експлуатації шнека в зоні контакту виникає локальний нагрів поверхні внаслідок інтенсивного тертя та дії абразивних частинок.

Після проведення випробувань на абразивне зношування теплостійкість покриття можна оцінити за характером поверхневих пошкоджень і стабільністю доріжки зносу. Основними ознаками недостатньої теплостійкості є:

- утворення мікротріщин;
- локальне відшарування покриття;

- зміна кольору поверхні;
- збільшення ширини доріжки зносу;
- інтенсивне окиснення;
- руйнування поверхневого шару.

Для CrN-покриттів висока теплостійкість проявляється у збереженні суцільності покриття, відсутності значного викришування та стабільній ширині доріжки зносу навіть при підвищених навантаженнях і швидкостях ковзання.

Зразки з PVD CrN-покриттям демонструють значно вищу теплостійкість завдяки високій стабільності нітридної фази CrN та її здатності зберігати твердість при локальному нагріванні. Під час випробувань покриття забезпечувало стабільний характер тертя, меншу ширину доріжки зносу та відсутність інтенсивного викришування поверхневого шару. Це свідчить про здатність CrN-покриття ефективно протидіяти термічному розм'якшенню та окиснювальному руйнуванню в умовах абразивного тертя.

У процесі випробувань покриття зберігало суцільність і не виявляло ознак інтенсивного відшарування або термічного розтріскування, що підтверджує ефективність використання PVD CrN-покриттів для деталей харчового обладнання, які працюють в умовах одночасної дії абразивного навантаження та локального нагрівання.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз зносостійкості та теплостійкості захисного PVD CrN-покриття на хромистій сталі 40X13 для шнека екструдера харчового обладнання. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що хромисті мартенситні сталі широко застосовуються для деталей харчового обладнання завдяки поєднанню корозійної стійкості, здатності до термічного зміцнення та достатньої міцності. Водночас у процесі експлуатації шнеки зазнають інтенсивного абразивного й адгезійного зношування, дії вологи, агресивних мийних середовищ та локального нагрівання, що призводить до поступового руйнування поверхневого шару.

У роботі обґрунтовано доцільність використання сталі 40X13 як матеріалу основи для шнека екструдера. Встановлено, що після гартування та низького відпуску сталь формує мартенситну структуру з карбідами хрому, яка забезпечує необхідну твердість та несучу здатність поверхні для подальшого нанесення зміцнювального покриття.

Проаналізовано особливості формування PVD CrN-покриття, механізм створення хромового підшару та роль іонного очищення аргонem у забезпеченні високої адгезії покриття до поверхні сталі. Встановлено, що вакуумне осадження нітриду хрому дозволяє формувати щільний дрібнозернистий поверхневий шар із високою твердістю, низькою пористістю та значною термічною стабільністю.

За результатами випробувань на абразивне зношування встановлено, що нанесення PVD CrN-покриття суттєво підвищує зносостійкість сталі 40X13. Зразки з покриттям характеризувались значно меншою втратою маси та меншою шириною доріжки зносу порівняно з незміцненою сталлю. У середньому застосування CrN-покриття дозволило знизити інтенсивність абразивного зношування приблизно у 4...5 разів залежно від режиму тертя.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз доріжок зносу показав, що для незміцненої сталі характерними є інтенсивне мікрорізання, пластична деформація та локальне викришування поверхні. Для зразків із CrN-покриттям спостерігалось значно менше руйнування поверхневого шару, що свідчить про високу стійкість покриття до дії абразивних частинок.

Дослідження теплостійкості показало, що PVD CrN-покриття зберігає суцільність і стабільність структури в умовах локального нагрівання, яке виникає під час тертя. Покриття характеризувалось відсутністю інтенсивного відшарування та термічного розтріскування, що підтверджує його високу ефективність для деталей, які працюють в умовах одночасної дії механічного та теплового навантаження.

Отримані результати підтверджують доцільність використання PVD CrN-покриттів для зміцнення шнеків екструдера харчового обладнання зі сталі 40X13. Застосування такого покриття дозволяє підвищити ресурс роботи деталей, знизити інтенсивність зношування та забезпечити стабільність експлуатаційних властивостей поверхні в умовах абразивного тертя та локального нагрівання.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang, X.; Zhao, W.; Shi, T.; Cheng, L.; Hu, S.; Zhou, C.; Cui, L.; Li, N.; Liaw, P.K. A Review on Tribological Wear and Corrosion Resistance of Surface Coatings on Steel Substrates. *Coatings* 2025, 15, 1314. <https://doi.org/10.3390/coatings15111314>.
2. <https://ua.precision-hardware-manufacturer.com/info/the-role-of-alloying-elements-in-steel-29060317.html>.
3. Hadia M, Mufti RA, Zahid R, Raza A. Effect of coatings on the tribological performance of engine valve train: A review. *International Journal of Engine Research*. 2025;26(8):1171-1192. doi:[10.1177/14680874241312566](https://doi.org/10.1177/14680874241312566).
4. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ra/d5ra02780b>.
5. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.
6. Chen, C.; Xue, Z.; Mu, W. Advanced Stainless Steel—From Making, Shaping, Treating to Products. *Material* 2025, 18, 4730. <https://doi.org/10.3390/ma18204730>.
7. Металознавство : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спец. G8 Матеріалознавство галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заоч. форм навч. / уклад.: І. В. Боярська, Н. П. Зайчук. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 121 с.
8. Shuang Liu, Yingfan Zhao, Zelin Yan, Xiangpeng Chang, Weiping Tong, Microstructure, hardness, and wear resistance of high-carbon hypereutectic high chromium irons containing W for use as roller sleeves, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 33, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.112>.
9. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d4ra01247j>.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ra/d5ra02780b>.
11. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 38 с.
12. Liu, J.; Mei, H.; Hua, J.; Wang, J.; Wang, Y.; Yi, G.; Deng, X. High-Temperature Oxidation and Wear Resistance of TiAlSiN/AlCrN Multilayer Coatings Prepared by Multi-Arc Ion Plating. *Nanomaterials* 2025, 15, 503. <https://doi.org/10.3390/nano15070503>.
13. Wang, Y.; Feng, C.; Lin, T.; Zhu, R.; Zhang, J.; Yang, H.; Yi, S.; He, J.; Tu, M.; Wei, G. A Review of Wear-Resistant Coatings for Steel Substrates: Applications and Challenges. *Metals* 2025, 15, 1231. <https://doi.org/10.3390/met15111231>.
14. Конструкційні матеріали для поліграфічної техніки: курс лекцій [Електронний ресурс] //навч. посіб. для докторів філософії спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» // Укладач: Т. А. Роїк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,54 Мбайт). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с..
15. Чепелюк, О.О. Гігієнічні вимоги до проектування обладнання харчових виробництв: підруч. / О.О.Чепелюк, О.А.Єщенко, Ю.Ю.Доломакін. – К.: НУХТ, 2017. – 311с.
16. <https://mfint.imp.kiev.ua/article/v47/i02/MFiNT.47.0199.pdf/>
17. Застосування корозійностійких, жаростійких, жароміцних сталей і сплавів у хімічному машино- та апаратобудуванні [Текст] : навч. посіб. / В. Г. Доброногов, І. О. Мікульонок. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 264 с. – Бібліогр.: с. 256–260. – 300 пр.
18. Методи досліджень та обробки у видавництві та поліграфії: курс лекцій [Електронний ресурс]//навч. посіб. для докторів філософії спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» // Укладачі: П. О. Киричок, Т. Ю. Киричок, Т. А. Роїк, О. І. Бараускене. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,38 Мбайт). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 210 с.

					БР 3626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		