

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 621.793.6

«До захисту допущено»

в.о. завідувача кафедри

 Антонюк В. С.

«12» 12 2019р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151. Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології
виробництва приладів

на тему: «Поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового
термоциклічного азотування»

Виконав (-ла):

студент VI курсу, групи ПБ-81мп
Прихожа Діана Володимирівна

Керівник:

Професор, доктор технічних наук
Антонюк В. О.

Консультант з Розробки стартап-проекту:

доцент кафедри менеджменту, доктор економічних наук
Бояринова К.О.

Рецензент:

С.Б. Висоцький, ПСМБ, к.т.н.

Позарак Г.А.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент 

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність(спеціалізація) – 151: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Антонюк В.С.

« 12 » 12 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Прихожой Діанні Володимирівні

1. Тема дисертації «Поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування», затверджена наказом по університету від « 04 » листопада 2019 р. № 3848-с

науковий керівник дисертації Антонюк Віктор Степанович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

2. Термін подання студентом дисертації 10 грудня 2019 року

3. Об'єкт дослідження – процес йонно-плазмового термоциклічного азотування.

4. Предмет дослідження: параметри процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз літературних джерел щодо формування зміцнених покриттів деталей приладів і механізмів. Визначити оптимальну систему для реалізації процесу хіміко-термічної обробки йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням. Визначити вплив

технологічних параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування зміцнених покриттів деталей приладів. Розробити теоретичну залежність впливу технологічних параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування на товщину зміцненого поверхневого шару.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу актуальність, мета, практична значимість роботи, наукова новизна, схема установки плазмового азотування, результат теоретичних досліджень впливу йонно-плазмового азотування на твердість та мікроструктуру сталі 40X13.

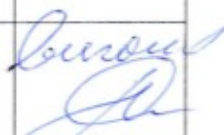
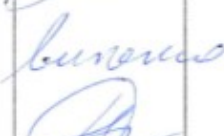
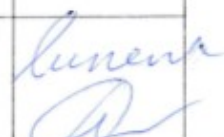
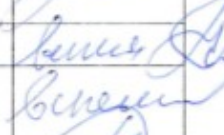
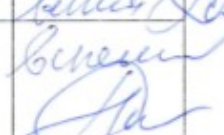
7. Орієнтовний перелік публікацій. Статті та тези доповідей (надано в Додатку Б у вигляді Форми 26).

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 5. Розробка стартап проекту «Поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування»	Бояринова К.О., доктор економічних наук, доцент		

9. Дата видачі завдання 10 вересня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проаналізувати методи поверхневого зміцнення поверхонь деталей приладів.	20.09.2019	
2	Розробити комплексну методику дослідження властивостей поверхонь, зміцнених йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням.	10.10.2019	
3	Розробити узагальнену модель процесу формування зміцненого шару. Дослідити вплив режимів йонно-плазмового термоциклічного азотування на твердість та мікроструктуру сталі 40X13.	20.10.2019	
4	Провести комплексні дослідження властивостей поверхонь, зміцнених йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням.	30.10.2019	
5	Створення стартап-проекту	18.11.2019	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту	03.12.2019	

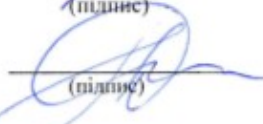
Студент


 (підпис)

Д.В. Прихожа

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації


 (підпис)

В.С. Антошок

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація обсягом 100 сторінок містить 36 рисунків, 4 таблиці, 2 додатка, складається з п'яти розділів.

В першому розділі проведено огляд вітчизняних і зарубіжних літературних джерел щодо поверхневого зміцнення деталей приладів і механізмах, фізичні основи технологічного процесу хіміко-термічної обробки азотуванням та камери для реалізації технологічного процесу хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді.

В другому розділі наведено методики і методи досліджень, матеріали і обладнання, які використовували для досліджень.

В третьому розділі проведено моделювання процесу формування покриттів методом йонно-плазмового термоциклічного азотування, а саме: розроблено принципову схему процесу формування дифузійного шару при йонно-плазмовому азотуванні, моделювання впливу режимів йонно-плазмового азотування на твердість та мікроструктуру зразків.

В четвертому розділі наведено результати досліджень, на основі яких встановлено закономірності формування структури і експлуатаційних властивостей покриттів залежно від технологічних параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.

В п'ятому розділі проведено аналіз можливостей виходу стартап проекту на ринок. Визначено фактори загроз та можливостей для реалізації продукту, обрано стратегію маркетингу.

Ключові слова: ЙОННО-ПЛАЗМОВЕ ТЕРМОЦИКЛІЧНЕ АЗОТУВАННЯ, ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ, ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ, ЗМІЦНЕНИЙ ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, МЕТОД ГРУПОВОГО ВРАХУВАННЯ АРГУМЕНТІВ.

SUMMARY

Master's thesis consists of 100 pages, contains 36 figures, 4 tables, 2 applications and has five sections.

The first section provides a review of literature on the formation of wear-resistant coatings of parts of devices and mechanisms as well as the physical basis technological process of chemical-thermal machining by nitriding and a tube for realization of technological process of chemical-thermal treatment of nitriding in glow discharge.

The second section describes the techniques and research methods, materials and equipment used for this research.

The third section outlines the modeling process of forming coatings by ion-plasma thermal cyclic nitriding, namely: a schematic diagram of the process of forming a diffusion layer in ion-plasma nitriding, modeling of modes of ion-plasma nitriding strength on contacting surface layers.

The fourth section presents the results of research of the structure and usage properties of coatings based on technological parameters of ion-plasma thermal cyclic nitriding.

The fifth section analyzes the possibilities of launching a startup project on the market. The factors of threats and opportunities for realization of the product are identified, the marketing strategy is selected.

Keywords: ION-PLASMA THERMAL CYCLIC NITRIDING, SURFACE STRENGTHENING, SURFACE ENGINEERING, FIRM SURFACE LAYER, MICROHARDNESS, WEAR RESISTANCE, GROUP METHOD OF DATA HANDLING.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1. Методи зміцнення поверхневих шарів деталі	12
1.2. Фізичні основи технологічного процесу хіміко-термічної обробки азотуванням	20
1.3. Вплив параметрів азотування на формування азотованого шару	24
1.4. Класифікація камер для реалізації технологічного процесу хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді	27
Висновки.....	32
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	33
2.1. Матеріали для дослідження процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування	33
2.2. Особливості процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.....	34
2.3. Устаткування для формування поверхневого шару матеріалу методом йонно-плазмового термоциклічного азотування.....	35
2.4. Підготовка виробів до йонно-плазмового термоциклічного азотування ...	41
2.5 Послідовність обробки деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування	42
2.6 Методика дослідження мікротвердості і мікроструктури поверхні	44
2.7. Статистична обробка експериментальних даних.....	46
Висновки.....	49
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ.....	50
3.1. Модель процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.....	50

3.2. Процеси, які виникають при йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні.....	53
3.3. Математична залежність товщини поверхневого зміцнення від параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування.....	55
Висновки.....	57

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ 58

4.1. Експериментальні дослідження	58
4.2. Дослідження мікроструктури зразків	64
4.3. Дослідження мікротвердості сформованого покриття	67
4.4. Моделювання впливу технологічних параметрів на поверхневе зміцнення деталей.....	70
Висновки.....	73

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ».....74

5.1 Опис ідеї проекту	74
5.2. Технічний аудит ідеї проекту.....	77
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	78
5.4.Розроблення ринкової стратегії проекту.....	86
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	89
Висновки.....	94

ВИСНОВКИ.....95

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....96

ДОДАТКИ

Додаток А. Програмне забезпечення.....	103
Додаток Б. Список наукових праць.....	114
Додаток В. Ілюстративні матеріали.....	118

ВСТУП

Актуальність.

Основне завдання вітчизняного приладо- та машинобудування – на базі новітніх досягнень науки і техніки, сучасних технологій випускати високоякісні прилади, машини та знаряддя виробництва, що відповідають вимогам і рівню світових стандартів.

Однією з основних тенденцій розвитку сучасного промислового виробництва є його інтенсифікація, яка в значній мірі зв'язана з розробкою і освоєнням нових прогресивних технологій і використанням нових конструкційних матеріалів і захисних покриттів, які мають підвищенні триботехнічними, фізико-хімічними і механічними характеристиками.

Підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей приладів, машин, інструментів, оснастки та інших виробів без зміни структури серцевини являється актуальною задачею, а одним з перспективних напрямків вирішення поставленої задачі є використання досягнень сучасної інженерії поверхонь.

Деталі приладів та механізми зазвичай працюють при високих механічних навантаженнях, підвищених температурах та в агресивних середовищах, що призводить до утворення складно-напруженого стану, в результаті чого виникає руйнування поверхневого шару деталі, що призводить до виходу з ладу приладів та механізмів.

Поверхнeve зміцнення деталей приладів застосовують для підвищення твердості, зносостійкості, корозійної стійкості триботехнічних та інших властивостей матеріалу.

Підвищення працездатності приладів досягається різноманітними методами отримання поверхневого зміцнення деталей. В залежності від умов експлуатації вибирається оптимальний метод для отримання певних характеристик виробу.

До методів поверхневого зміцнення деталей відносяться: термічна обробка, поверхневе пластичне деформування, хіміко-термічна обробка.

Йонно-плазмове термоциклічне азотування відноситься до енергозберігаючих та екологічно чистих технологій поверхневого зміцнення. Метод застосовують для модифікації поверхні на етапах створення та ремонту конструкційних елементів приладів та механізмів.

Вдосконалення методу йонно-плазмового термоциклічного азотування для поверхневого зміцнення деталей приладів та отримання специфічних фізико-механічних і експлуатаційних властивостей сприяє збільшенню ресурсу роботи та надійності приладів, які працюють в умовах тертя, агресивних середовищ та при великих навантаженнях.

У магістерській дисертаційній роботі вирішується задача підвищення ресурсу роботи приладів теоретичними та експериментальними дослідженнями з урахуванням впливу технологічних параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування функціонального покриття деталей приладів.

Метою дослідження є виявлення впливу параметрів технологічної обробки методом йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування поверхневого шару сталі 40Х13.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

1. Провести аналіз літературних джерел щодо видів формування поверхневого зміцнення деталей приладів.
2. Визначити параметри технологічної системи реалізації процесу хіміко-термічної обробки йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням.
3. Визначити вплив технологічних параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування зміцнених покриттів деталей приладів.
4. Розробити теоретичну залежність впливу технологічних параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування на товщину зміцненого поверхневого шару.

Об'єктом дослідження є процес йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Предметом дослідження є параметри процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Методи дослідження.

Для досліджували процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування використовували метод поверхневого зміцнення деталей, заснований на теорії термічної втоми, ефекті дискретного енерговведення та аномального масопереносу при механічному навантаженні.

В процесі виконання магістерської дисертації використовуються методи дослідження мікротвердості та макроструктури поверхневого шару.

Для обробки експериментальних даних використовували статистичні методи –метод групового врахування аргументів (МГВА).

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблена теоретична залежність впливу режимів йонно-плазмового азотування на глибину поверхневого шару матеріалу.
2. Встановлено закономірності формування зміцненого шару і експлуатаційних властивостей покриттів залежно від технологічних параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.
3. Досліджено вплив технологічних параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування на твердість та мікроструктуру сталі 40X13.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Вдосконалено технологію поверхневого зміцнення деталей приладів та інструменту методом йонно-плазмового термоциклічного азотування.
2. Отримано технологічні параметри формування зносостійкого вакуум-плазмові покриття на сталь 40X13, які підвищують твердість поверхневого шару.
3. Розроблено програмне забезпечення для отримання залежності глибини поверхневого шару від технологічних параметрів обробки.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Методи зміцнення поверхневих шарів деталі

Однією з причин відмов роботи приладів є зношування поверхонь робочих деталей. Знос поверхонь представляє процес руйнування поверхневого шару матеріалу деталей, що призводить до порушення робочих властивостей деталей.

Умови роботи деталей приладів визначають наявність декількох видів зносу, одні призводять до руйнування поверхневого шару, інші пришвидшують процес руйнування.

Отже важливою задачею підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей приладів є вибір методу поверхневого зміцнення деталей [1-4].

На рисунку 1.1 показана класифікація методів зміцнення поверхневих шарів деталей приладів



Рис1.1. Класифікація методів зміцнення поверхневих шарів деталей

Для підвищення надійності робочих поверхонь деталей приладів широко використовується такий метод зміцнення поверхневих шарів деталей приладів, як термічна обробка. В результаті термічної обробки відбувається зміна

структурно-фазового складу матеріалу шляхом нагріву, витримки та охолодження.

Найбільш поширеними методами термічної обробки які використовуються в промисловості є: загартування, відпал, нормалізацію.

Загартування – метод зміцнення поверхневих шарів деталей шляхом нагріву сталі до температури вище фазових перетворень, витримки при цій температурі і швидке охолодження [1, 3-4]. В результаті загартування утворюється мартенситна структура металу – перенасичений твердий розчин вуглецю в альфа-залізі.

Загартування застосовується для підвищення міцності, твердості та зносостійкості робочих поверхонь деталей приладів. В той же час при загартуванні виникають дефекти такі як підвищення крихкості матеріалу, низька пластичність, окислення, знеуглецювання, перепал тощо.

Відпал – метод зміцнення поверхневих шарів деталей шляхом нагріву сталі до температури вище фазових перетворень та повільним охолодженням зі швидкістю $2...3^{\circ}\text{C}$ за хвилину [1, 4].

На відміну від загартування термічна обробка відпалом призводить до підвищення пластичності матеріалу та зменшення внутрішніх напружень.

Технологічний процес включає нагрів деталей та витримку при температурі, вище фазових перетворень, тому виникають такі недоліки: висока температура обробки та габарити устаткування. Також негативний вплив на час обробки впливає повільне охолодження деталей.

Нормалізація - метод зміцнення поверхневих шарів деталей шляхом нагріву сталі до температури вище фазових перетворень, витримки при цій температурі та охолодженням на повітрі [4-5].

В результаті нормалізації в металі утворюється дрібнозерниста структура та підвищуються механічні властивості матеріалу.

Нормалізацію застосовують при обробці деталей складної конфігурації, з метою уникнення деформації поверхні. Проте охолодження деталей на повітрі призводить до збільшення часу обробки деталей, та негативно впливає на

продуктивність процесу. Також недоліками є висока температура обробки та габаритне обладнання.

Поверхнєве пластичне деформування (ППД)— метод зміцнення поверхневих шарів деталі шляхом холодної пластичної деформації, за допомогою якого в поверхневому шарі деталі утворюються залишкові напруження, що призводить до зміни властивостей матеріалу і мікрогеометрії поверхні [3, 6-7].

Застосування методу ППД призводить до збільшення довговічності деталей в 5-15 разів, підвищення шорсткості поверхні до 0,2...0,8 мкм. Для реалізації процесу зміцнення деталей методом ППД необхідним застосовують спеціальну оснастку та інструменти, що призводить до збільшення собівартості виробу.

Поверхнєве пластичне деформування поділяють на обкатування, розкочування, калібрування, алмазне, динамічне.

Обкатування - метод зміцнення поверхневих шарів деталі за допомогою кочення по поверхні деформуючого інструменту – шара або ролика [6-7].

Розкочування – метод зміцнення поверхневих шарів, при якому пластична деформація внутрішніх поверхонь деталей здійснюється за допомогою кочення по поверхні спеціального інструменту – розкатки [3, 5, 6-7].

Калібрування – метод поверхневого зміцнення деталей, який полягає в протягуванні спеціального деформуючого інструменту – дорна через отвір [6-7].

Алмазне деформування— метод поверхневого зміцнення деталей, за допомогою переміщення алмазного інструменту по поверхні деталі з малим коефіцієнтом тертя [6-8].

Динамічне деформування – процес динамічного зміцнення поверхневого шару матеріалу реалізується за допомогою подачі на поверхню деталі твердих частин з великою швидкістю [6-9].

Хіміко-термічна обробка – процес обробки поверхневого шару матеріалу шляхом насичення поверхні легуючими елементами [1,10].

Процес хіміко-термічної обробки поверхні полягає в насиченні поверхневого шару деталі елементом (наприклад, азот, алюміній, хром тощо), що знаходиться в атомарному стані, шляхом дифузії з навколишнього середовища при високій температурі.

В залежності від насичуючого елементу та властивостей поверхневого шару матеріалу хіміко термічна обробку поділяють: цементация, борування, хромування, титанування, азотування.

Одним з розповсюджених методів хіміко-термічної обробки є цементация.

Цементация – процес насичення поверхневого шару деталі вуглецем з метою отримання мартенситної структури [1,10].

Результатом процесу цементации є висока твердість та зносостійкість поверхневого шару матеріалу. Для підвищення межі міцності після цементации рекомендовано виконати термічну обробку.

Низьковуглецеві сталі піддаються цементации для уникнення насичення серцевини сталі вуглецем та підвищення в'язкості.

Вибір температури нагріву при цементации визначається механізмом дифузії вуглецю в кристалічну решітку заліза. Підвищення температури прискорює процес дифузії, але починається процес росту зерна аустеніту. Чим вище температура цементации, тим більший розмір зерна формується в структурі сталі.

Поверхневий шар, отриманий в результаті цементации має змінну концентрацію вуглецю по глибині. У зв'язку з цим після охолодження в структурі матеріалу розрізняють три зони [1]:

- 1) заевтектоїдна (перліт та вторинний цементит);
- 2) евтектоїдну (пластинчатий перліт);
- 3) доевтектоїдна (перліт та ферит).

Ефективною товщиною поверхневого шару являються заевтектоїдна, евтектоїдна та половина доевтектоїдної зони або глибина розповсюдження контрольної твердості вище визначеного значення.

В якості контрольної твердості застосовують [3]:

- 1) твердість HRC 50, яка визначає глибину евтектоїдної зони і половини перехідної зони;
- 2) твердість HV 540...600 при навантаженні 1...5 кг.

Товщина поверхневого шару після цементації зазвичай становить 0,5...1,8 мм. Товщина насичення залежить від температури обробки. При підвищенні температури обробки збільшується і товщина поверхневого шару.

Для уникнення погіршення механічних властивостей металу вміст вуглецю в поверхневому шарі після обробки має складати 0,8...10%.

Для деталей, які працюють при високих температурах застосовують хіміко-термічну обробку - борування.

Борування – технологічний процес хіміко-термічної обробки, при якому відбувається насичення поверхневого шару матеріалу бором з метою отримання боридів заліза [1, 10].

Хіміко термічну обробку борування використовують для підвищення твердості поверхні і зносостійкості. Поверхневий шар після обробки жаростійкий. Деталі після обробки боруванням можуть працювати при температурі від 800 до 1000 °C [3, 5, 10].

Не зважаючи на всі переваги методу в результаті обробки підвищується хрупкість поверхневого шару деталі, що призводить до зменшення областей використання деталей. Отже борування не рекомендовано застосовувати для зміцнення поверхневих шарів деталей, які піддаються в процесі експлуатації ударним навантаженням.

Одним з негативних наслідків хіміко-термічної обробки борування є зміна на шорсткість поверхні в результаті реалізації технологічного процесу. Якщо розмір мікронерівностей поверхні знаходиться до 3 мкм деталь потребує подальшої механічної обробки.

Через високу твердість поверхні для проведення чистових операцій потрібно використовувати алмазний інструмент або шліфувальні круги з корундом або карбідом кремнію.

Вибір сталі для борування визначається впливом легуючих елементів на швидкість дифузії бора. Вуглець та легуючі елементи призводять до зменшення глибини борованого шару (рис 1.2) [1].

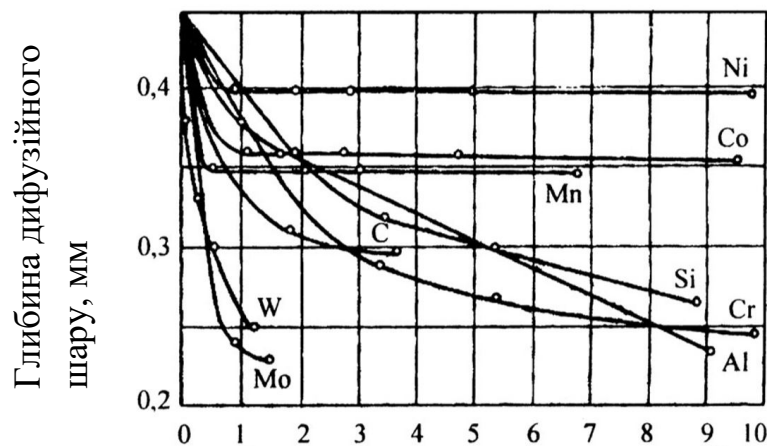


Рис 1.2. Вплив легуючих елементів на глибину дифузійного шару [1].

Збільшення вуглецю в сталі до 0,8% призводить до підвищення енергії активації процесу на 5...7%.

Вуглець займає вільні місця перешкоджає проникненню атомів бора в глибину деталі, таким чином сповільнює процес дифузії. Вплив інших легуючих елементів на глибину оброблюваного шару визначається їх хімічною активністю до створення боридів.

До активних відносять: вольфрам, молібден, хром. Присутність цих елементів в сталі сприяє підвищенню твердості шару до 2400...3000 HV.

Особливостями поверхневого шару утвореного в результаті технологічного процесу борування є висока твердість та надійний зв'язок з основним металом. Структура поверхневого шару матеріалу залежить від максимальної концентрації бору в поверхневому шарі в результаті обробки.

При досягненні на поверхні деталі концентрації бора приблизно 16 %, формується багатофазний поверхневий шар.

На поверхні деталі утворюється шар насичений боридом FeB або суміші двох фаз – FeB і Fe_2B . Перехідний шар складається зі суміші твердого розчину бора в залізі і бориду Fe_2B .

Температура процесу борування знаходиться в межах від 900 до 1100 °C. Тривалість процесу в залежності від товщини шару становить 2...10 год. Для захисту поверхонь, які не підлягають обробці використовують гальванічне покриття товщиною 0,015 мм [1, 5].

Одним з перспективних методів поверхневого зміцнення деталей є хіміко-термічна обробка хромування.

Хромування – технологічний процес обробки поверхневого шару матеріалу, з метою підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, жаростійкості та ерозійної стійкості шляхом дифузійного насичення поверхні деталі хромом [1, 5, 10].

Експлуатаційні властивості поверхневого шару після обробки залежать від кількості вуглецю в сталі.

Хромування низьковуглецевих сталей використовується для отримання на поверхні деталі жаростійких шарів. Твердість хромованого шару, знаходиться в межах від 1500 до 3000 МПа [1].

Хромування високовуглецевих сталей виконується для підвищення зносостійкості поверхні. Застосовується для обробки деталей, які в процесі експлуатації працюють при великих контактних навантаженнях. Твердість поверхневого шару після обробки складає 12000-13000 МПа [5].

Технологія хромування виконується в різних видах насичуючого середовища (твердому, рідкому, газоподібному).

Найбільш поширеним є метод хромування в порошках. Це зумовлено простотою обладнання та технологічного процесу. Деталі розміщують в герметичні контейнери з порошком і піддають високотемпературному нагріву (1000...1150 °C) протягом 3...12 годин. Швидкість збільшення глибини поверхневого шару складає 5...15 мкм/год.

Хромування в газовому середовищі проводять в спеціальних печах, герметичних контейнерах, які встановлюють для нагріву в піч. Насичення відбувається при температурі 900-1100 °С. нагрів відбувається в нейтральному середовищі або вакуумі (0,133-0,00133 Па).

В якості рідкого середовища застосовують хлористі солі з ферохромом, які попередньо оброблюють соляною кислотою. Найбільш розповсюджена суміш складає 70 % BaCl_2 і 30 % NaCl . Температура технологічного процесу знаходиться в межах від 1000 до 1050 °С. Час насичення складає 1...6 год. Глибина поверхневого шару – 0,05...0,3 мм [5].

Для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості поверхневого шару матеріалу застосовують метод титанування..

Титанування – технологічний процес хіміко-термічної обробки, під час якого відбувається дифузійне насичення поверхневого шару виробу титаном [1, 11].

Експлуатаційні властивості поверхневого шару виробу залежать від хімічного складу сталі. Насичення титаном низьковуглецевих сталей (0,08...0,15% С) сприяє підвищенню корозійної стійкості. Насичення титаном високовуглецевих сталей призводить до підвищення твердості поверхневого шару до 2000 HV.

Структура поверхневого шару після технологічного процесу титанування низьковуглецевих сталей має декілька зон [1, 11]:

- 1) твердий розчин Fe-Ti (цей шар має високу корозійну стійкість).
- 2) безвуглецева зона (виникає через карбідоутворюючу властивість титану).
- 3) зона основного металу (хімічний склад матеріалу залишається без змін).

Через карбідоутворюючу властивість титану при низькому вмісту вуглецю в матеріалі деталі може утворитись безвуглецева зона. Поява такої зони для деталей які в процесі експлуатації працюють при великих

навантаженнях, створює небезпеку порушення поверхневого шару в глибину деталі.

Будова поверхневого шару після технологічного процесу титанування високовуглецевих сталей має три області [5, 11]:

- 1) зі значним вмістом карбідів титану і мартенситної матриці;
- 2) проміжну мартенситну-аустенітну;
- 3) основного металу.

Хіміко-термічну обробку титаном проводять в твердих, рідких та газоподібних середовищах. Насичення титаном відбувається при температурі 1000-1100 °С. Глибина поверхневого шару утвореного за допомогою технологічного процесу титанування не перевищує 200 мкм.

Азотування – вид хіміко-термічної обробки деталей шляхом утворення в поверхневому шарі насичення поверхні хімічних з'єднань азоту з металами – нітридів, які утворюються в результаті контакту поверхні виробу з середовищем насичення [5,12]. Нітриди надають сталі високу твердість, отже після азотування деталі не потребують додаткової термічної обробки.

Метод хіміко-термічної обробки азотуванням дозволяє отримувати поверхнєве зміцнення з високою твердістю та корозійною стійкістю, в порівнянні з іншими методами. Азотування має безліч різновидів, проте найперспективнішим напрямком являється азотування в тліючому розряді.

1.2 Фізичні основи технологічного процесу хіміко-термічної обробки азотуванням

Процес обробки азотуванням зв'язаний з утворенням гетеродифузійних процесів, які призводять до збільшення концентрації атомів легуючого елементу в поверхневому шарі деталі.

Процес хіміко-термічної обробки азотуванням складається з трьох етапів [1,13]:

1. створення в середовищі деякої концентрації елементу, котрий дифундує, в атомарному вигляді;

2. переміщення адсорбції активних атомів елементу, що дифундує, на поверхні деталі зі створенням різниці концентрації цього елементу між насичуючим середовищем і матеріалом деталі;
3. дифузійного проникнення і переміщення атомів елемента, що дифундує, в матеріалі деталі.

На першому етапі хіміко-термічної обробки азотуванням елемент, що дифундує, переходить в атомарний (активний) стан. Дифузійна активність насичуючого середовища визначається наявністю можливості перетворення легуючого елементу в атомарний стан і створення достатньої концентрації цього елементу для проникнення в деталь. Висока концентрація в середовищі легуючого елементу, котрий знаходиться в молекулярному вигляді не забезпечує високу дифузійну активність насичуючого середовища.

Способів переводу легуючого елементу в атомарний стан [1, 13-15]:

- 1) насичення через газове середовище;
- 2) насичення з рідкого середовища;
- 3) насичення з парофазових середовищ.

Активізація легуючого елементу шляхом утворення нестійкої газової фази, яка легко розкладається при контакті з поверхнею деталі на атоми легуючого елемента та елемента-носія, є одним з найпоширеніших методів проведення хіміко-термічної обробки азотування.

Робоче газове середовище повинне відповідати таким вимогам [5, 11]:

- не утворювати конденсату в інтервалі робочих температур;
- самовідновлюватись на основі відтворюваних реакцій;
- не мати хімічної взаємодії з поверхнею деталі.

Газове безконтактне насичення відбувається в печі. Для насичення поверхні деталі в піч подається газ, який складається з 50% аміаку та 50% пропану.

Процес відбувається при температурі 570⁰С, протягом 3 годин. Азотований шар формується на невеликій глибині порівняно з іншими методами насичення.

В процесі ізотермічного азотування в середовищі аміаку при температурі вище 400°C в печі відбувається реакція дисоціації аміаку [5]:



В результаті реакції утворюється атмосфера, котра складається з атомарного азоту, водню і недисоційованого аміаку. Від концентрації атомарного азоту залежить степінь насиченості поверхні матеріалу атомами азоту. В інтервалі температур від 480 до 600°C ступінь дисоціації аміаку знаходиться в межах $15 \dots 60\%$ [1,10].

З підвищенням температури степінь дисоціації аміаку збільшується. При температурі 800°C кількість аміаку складає $0,012\%$.

Висока концентрація водню призводить до деазотування поверхні. Для зниження шкідливого впливу водню і регулювання азотного потенціалу до аміаку додають чистий азот, кисень і гази, котрі містять вуглець.

Для конструкційних і теплостійких сталей застосовують ізотермічне азотування при температурі $500 \dots 520^{\circ}\text{C}$. В результаті обробки конструкційних сталей при таких температурах формується поверхневий шар матеріалу з максимальною твердістю.

Для прискорення процесу дифузії азотування розбивають на два етапи. Спочатку обробка проводиться при $500 \dots 520^{\circ}\text{C}$, а потім температуру підвищують до $550 \dots 570^{\circ}\text{C}$. Під час першого етапу в поверхневому шарі утворюються дрібнодисперсні нітриди з підвищеним вмістом азоту. На другому етапі виникає дифузія азоту в глибину деталі, котра протікає з великою швидкістю. Інколи після цього етапу деталь витримують при температурі $500 \dots 520^{\circ}\text{C}$ в атмосфері без подачі аміаку для зниження концентрації азоту в поверхневому шарі [5, 16].

Вироби з конструкційних і корозійностійких сталей азотують при температурі $500 \dots 600^{\circ}\text{C}$. Вибір температури азотування для виробів визначається вимогами до товщини і твердості шару: при високій твердості і невеликій товщині шару рекомендується застосовувати низьку температуру, при великих товщинах і нижчій твердості застосовують більш високу

температуру. Перевагою насичення з газового середовища є простота реалізації процесу. Недоліками - габаритні розміри установки.

При другому способі в якості середовища насичення використовують рідну. Для реалізації процесу використовують розплави ціаністих солей.

Процес азотування в рідкому середовищі проводиться при температурі 570°C протягом 30...180 хв.

Перевагою насичення з рідкого середовища в порівнянні з іншими є компактність при зберіганні та транспортуванні, проте через те, що насичуючий елемент знаходиться в рідкому стані регулювання технологічних параметрів процесу значно ускладнюється.

Парофазове азотування відбувається в тліючому розряді [16-18]. Застосування тліючого розряду можливе тільки в розрядженій атмосфері аміаку або азоту (тиск в камері 1-133 Па). Легуючий елемент постачають до камери у газоподібному вигляді. При цьому деталь являється катодом, камера – анодом.

Між ними виникає тліючий дуговий розряд, котрий призводить до йонізації атомів легуючого елементу. Іони азоту розганяються в тліючому розряді з напругою 400-800 В до значних швидкостей і бомбардують поверхні виробу.

Під час удару відбувається проникнення йону в поверхневий шар деталі. Поверхонь нагрівається до температури дифузійного переміщення ($470-580^{\circ}\text{C}$), після чого йони починають проникати в поверхневий шар матеріалу.

Тривалість процесу іонного азотування від декількох хвилин до 24 год. Одним з перспективних методів обробки в парофазових середовищах є йонно-плазмове термоциклічне азотування.

Під час другого етапу хіміко-термічної обробки азотуванням відбувається адсорбція атомів легуючого елементу на поверхні деталі, в результаті чого створюється різниця концентрацій.

Адсорбція – це накопичення атомів газоподібного або розчиненого в рідині елементу (адсорбата) на поверхні твердого тіла (адсорбента) [16, 19].

Поверхня деталі має надлишкову поверхневу енергію. Підвищений енергетичний стан створює умови для притягнення атомів легуючого елементу до поверхні деталі. Осадження атомів на поверхні деталі сприяє зниженню поверхневої енергії, тому процеси адсорбції є енергетично вигідними [20-22].

На характеристики процесу адсорбції значно впливає якість попередньої обробки поверхні деталі. Наявність будь-яких забруднень ускладнює накопичення атомів легуючого елементу на поверхні, а також процес дифузії.

В залежності від характеру взаємодії атомів адсорбата і адсорбента розрізняють фізичну адсорбцію і хемосорбцію. Фізична адсорбція не супроводжується суттєвими змінами електронної структури молекул. Легуючі елементи вільно пересуваються по поверхні деталі. При хемосорбції між атомами адсорбента і атомами адсорбата утворюється хімічний зв'язок.

На третьому етапі хіміко-термічної обробки азотуванням відбувається дифузія атомів в поверхневий шар деталі. Дифузія відбувається за рахунок різниці концентрації речовини на поверхні деталі та підвищення температури. Важливими характеристиками даного етапу є температура нагріву та тривалість витримки. Розрізняють процеси які реалізуються по механізму проникнення і механізму заміщення[12, 19].

Для елементів, розмір атомів яких значно менший атома заліза дифузія проходить шляхом проникнення атомів у вузли кристалічної решітки вихідного матеріалу. Такий механізм дифузії характеризується відносно невисоким значенням енергії активації і проходить при відносно невеликих температурах нагріву.

Для елементів, в яких розмір атомів легуючого елементу та атому заліза приблизно однакові, дифузія реалізується механізмом заміщення. При підвищенні температури збільшується енергія атомів кристалічної решітки, в результаті чого амплітуда коливань у вузлах кристалічної решітки підвищується, що призводить до виходу атомів із регулярного положення. В кристалічній решітці утворюються вакантні місця. Підвищення температури

призводить до збільшення вакансій, що в свою чергу сприяє прискоренню процесу дифузії.

При формуванні поверхневого покриття методом азотування виникає декілька процесів, які взаємодіють між собою. При формуванні покриття важливий вплив на механічні властивості має процес дифузії, який відповідає за проникнення атомів легуючого елементу в глибину поверхні деталі [23-24].

1.3 Вплив параметрів азотування на формування азотованого шару

Важливим етапом хіміко-термічної обробки азотування є насичення легуючими елементами поверхневий шар деталей приладів. Механічні властивості матеріалу та товщина поверхневого шару залежить від процесу дифузії насичуючого елементу в оброблюваний матеріал.

Дифузія - процес проникнення і подальшого переміщення речовини на відстань більше, ніж параметр кристалічної решітки [1, 5, 13].

Основний параметр дифузії – швидкість переносу маси легуючого елементу через одиницю площі за одиницю часу. Швидкість дифузії атомів легуючого елементу в рештку заліза неоднакова. При насиченні азотом, котрий утворює з залізом тверді розчини проникнення, дифузія проходить швидше, ніж при насиченні металами, котрі утворюють тверді розчини заміщення.

Товщина проникнення (дифузія) залежить від температури і тривалості насичення (рис.1.3).

Товщина дифузійного шару x в залежності від тривалості процесу t при даній температурі зазвичай виражається параболічною залежністю. Отже зі збільшенням часу обробки швидкість товщини поверхневого шару зменшується (рис. 1.3 а). [1,26]

Підвищення температури призводить до збільшення швидкості процесу дифузії, отже проникнення легуючого елементу в глибину поверхневого шару деталі сильно збільшується зі збільшенням температури процесу (рис. 1.3 б) [1, 26].

Товщину дифузійного насичення при незмінному часі обробки та сталій температурі можна підвищити за допомогою збільшення концентрації елементу, що дифундує на поверхні металу (рис.1.3 в) [3, 21].

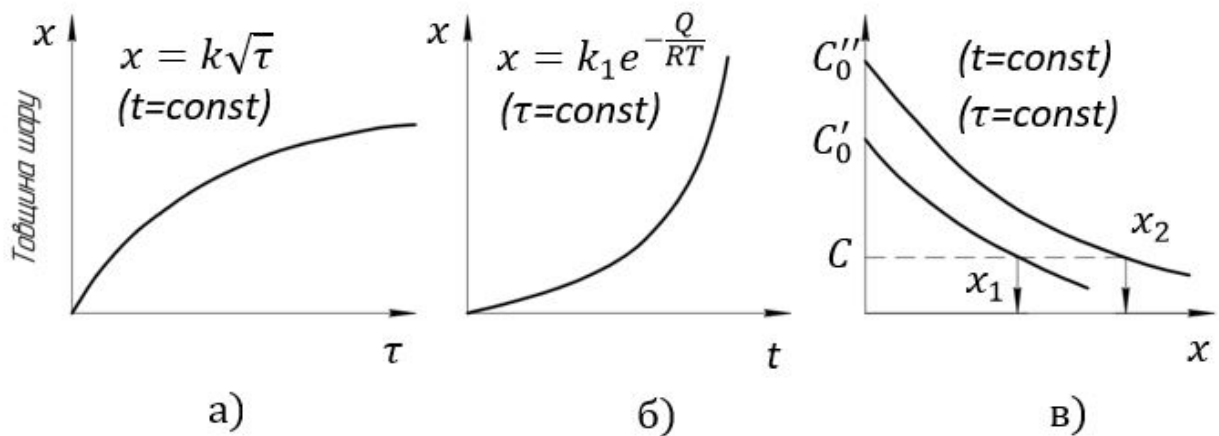


Рис. 1.3. Вплив параметрів азотування на формування азотованого шару [1].

Природа первинних утворень, фазовий склад і зміна концентрації по товщині дифузійного шару описані за допомогою діаграми стану: метал розчинник-дифундуєчий елемент (рис 1.4).

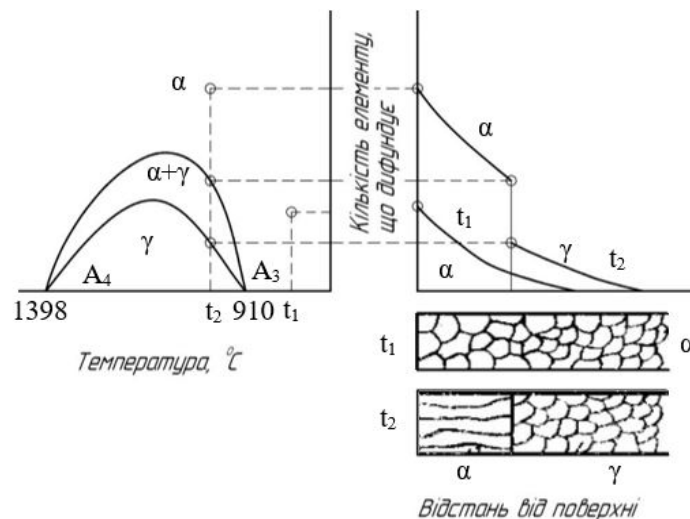


Рис. 1.4. Діаграма стану: метал розчинник-дифундуєчий елемент [1].

При температурі t_1 дифузія протікає в решітці α без фазових перетворень. Отже при температурі насичення існує тільки α -твердий розчин і концентрація

елемента, що дифундує поступово зменшується від максимальної на поверхні до нуля на деякій глибині [1, 26-27].

Насичення при температурі t_2 супроводжується фазовою перекристалізацією. Дифузія спочатку протікає в γ -фазі, при досягненні на поверхні межі розчинності відбувається фазова перекристалізація γ - α [5, 26-27].

Зародки α -фази від поверхні збільшуються в напрямленні дифузії, утворюючи характерні стовпчасті кристаліти.

На межі розподілу двох фаз встановлюється перепад концентрації, а в мікроструктурі (після охолодження) утворюється дифузійна лінія (межа). Двофазні поверхневі шари виникають під час охолодження.

При насиченні легованої сталі при температурі дифузії можуть виникнути багатофазні шари.

Товщина азотованого поверхневого шару змінюється від технологічних параметрів обробки [28]. Варіюючи параметрами технологічного процесу, можна отримати двофазні та багатофазні шари.

1.4. Класифікація камер для реалізації технологічного процесу хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді

Як показав аналіз існуючих установок для азотування в тліючому розряді устаткування їх можна поділити за типом керування процесом, методом підготування газового середовища, способу дозування газової суміші, типом струму живлення, способу контролю температури, підключення аноду, типу конструкції охолодження камери (рис.1.5) [29].

Реалізація технологічного процесу може виконуватись з втручанням людини або без втручання людини, це залежить від типу керування системою для хіміко-термічної обробки.

При ручному керуванні зменшується точність вимірювання, проте перевагою є простота реалізації системи.

При напівавтоматичному керуванні перевагою є автоматичне регулювання половини параметрів технологічного процесу.



Рис.1.5. Класифікація установок хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді за типом керування процесом

Для контролю інших параметрів потрібне втручання людини, що зменшує точність параметрів технологічного процесу.

Автоматичний процес відрізняється тим, що відбувається контроль всіх параметрів технологічного процесу, проте підвищується складність реалізації системи.

Для проектування програмного керування виникає складність створення якісної моделі технологічного процесу, в той же час відбувається оперативна корекція параметрів технологічного процесу.

Для створення поверхневого шару з певними хімічними властивостями потрібно обрати оптимальний метод підготовки газового середовища [13]. Методи підготовки поділяють на ручний, напівавтоматичний, автоматичний (рис.1.6).



Рис.1.6. Класифікація установок хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді за методом підготовки газового середовища.

При ручній подачі газової суміші відбуваються значні перериви подачі газу, що призводить до порушення технологічних параметрів обробки.

Напівавтоматичний метод спрощує контроль подачі газової суміші в процесі обробки, проте через складність підготування газової суміші рекомендується застосовувати при застосуванні обробки з постійними режимами. Для реалізації автоматичного методу підготовки газової суміші потрібні датчики контролю, що підвищує собівартість системи, проте з'являється можливість зміни газової суміші в процесі обробки [13].

Регулювання кількості суміші, яку подають в вакуумну камеру, при хіміко-термічній обробці азотуванням в тліючому розряді здійснюється трьома способами: за об'ємом, за тиском, струменевим (рис.1.7).



Рис.1.7. Класифікація установок за способом підготовки газового середовища.

Використовуючи метод дозування за об'ємом підвищується точність відсоткового відношення суміші, проте виникає складність реалізації процесу [17].

Застосовуючи спосіб дозування за тиском перевагою є простота схеми та можливість керування в ручному режимі, проте при обробці з великим тиском виникає складність регулювання даного процесу.

При струменевому методі насичуючі елементи подаються безперервно, що є перевагою для процесу з незмінними технологічними параметрами, хоча виникає проблема регулювання.

Для нагріву деталі та дифузії атомів в поверхневий шар деталі хіміко-термічної обробки при азотування в тліючому розряді на корпус та об'єкт обробки подається струм живлення (рис.1.8)..

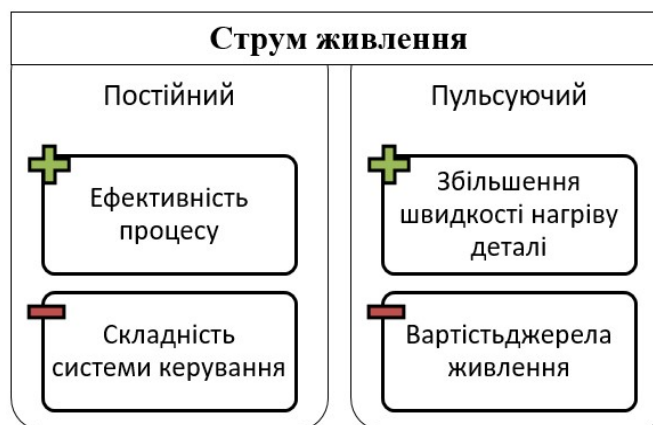


Рис.1.8. Класифікація установок хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді за струмом живлення.

При хіміко-термічній обробці азотуванням в тліючому розряді розрізняють системи, які використовують постійний та пульсуючий струм живлення.

При постійному струмі живлення перевагою є ефективність процесу, проте виникає складність керування. Використовуючи пульсуючий метод збільшується швидкість нагріву деталі, але збільшується собівартість виробу.

Важливим етапом хіміко-термічної обробки азотування є контроль температури обробки [30]. Контролювати температуру можна безконтактним та контактним методами (рис.1.8.).

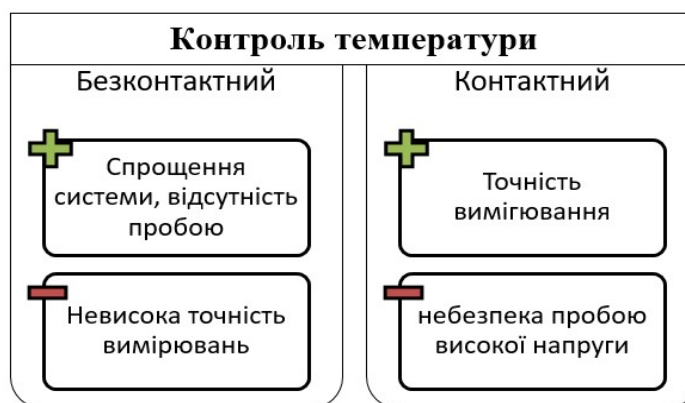


Рис.1.8. Способи контролю температури установок хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді за струмом живлення

При безконтактному методі погіршується точність пробою, але важливою перевагою є відсутність пробою. Застосування контактного методу призводить до збільшення точності вимірів, проте виникає небезпека пробою високої напруги [5].

В залежності від підключення аноду системи поділяють на анод-корпус та окремий анод. При першому методі підключення перевагами є спрощення комутації та рівномірна обробка всіх поверхонь деталей (рис.1.9.).

Використовуючи другий метод виникає небезпека пробою, проте знижуються вимоги до чистоти поверхні корпусу.



Рис.1.9. Способи підключення аноду в системах установок хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді

В процесі хіміко термічної обробки відбувається постійне охолодження камери. В залежності від методу охолодження конструкції камер поділяють на двостінні та з трубчатим охолодженням (рис. 1.10).



Рис.1.10. Способи охолодження камер в системах установок хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді

При першому методі збільшується маса вакуумної камери, що призводить до складності транспортування та реалізації такої конструкції. Застосовуючи другий метод зменшується вага камери, а також спрощується технологічний процес виготовлення.

Проаналізувавши існуючі методи зміцнення поверхневих шарів деталей приладів встановлено, що найбільш ефективним є метод хіміко-термічної обробки азотування в тліючому розряді з напівавтоматичним керуванням, автоматичним методом підготовки газового середовища, дозування газової суміші за об'ємом, з пульсуючим струмом живлення, безконтактним способом контролю температури, підключення корпусу в якості анода та з трубчатим охолодженням корпусу.

Висновки.

Аналіз літературних джерел, показав, що хіміко-термічна обробка деталей приладів набуває поширення в сучасному приладобудуванні.

За допомогою хіміко-термічної обробки можна досягти високої твердості поверхневого шару, та зберегти пластичність серцевини, що сприяє розширенню області використання.

Проаналізувавши методи насичення та конструкції устаткування, виявлено, що найбільш ефективно насичення відбувається з парофазового середовища.

Для зміцнення поверхневих шарів деталей приладів ефективними методом реалізації технологічного процесу хіміко-термічної обробки є азотування в тліючому розряді.

Одним прогресивних методів поверхневого зміцнення деталей приладів є йонно-плазмове термоциклічне азотування.

РОЗДІЛ. 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

2.1. Матеріали для дослідження процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування

Для дослідження впливу параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування фізико-механічних характеристик (твердість, зносостійкість, корозійну стійкість тощо) зміцненого поверхневого шару, як дослідні зразки використовували високолеговану, корозійностійку, жароміцну сталь мартенситного класу В – 40X13 (ГОСТ 5632-2014)

Хромовані сталі мартенситної групи мають високу корозійну стійкість, підвищену жароміцність та жаростійкість.

Підвищена жароміцність спричинена високою концентрацією хрому в хімічному складі твердого розчину (відношення Cr/C в цих сталях значно перевищує критичне). В таблиці 2.1 приведено хімічний склад сталі 40X13 (ГОСТ 5632-2014) [31].

Таблиця 2.1. Хімічний склад сталі 40X13(ГОСТ 5632-2014) [31].

М арка сталі	Вміст елементів, %					
	Хром (Cr)	Вуглець (C)	Кремній (Si)	Марганець (Mn)	Сірка (S)	Фосфор (P)
40X13	12...14,0	0,36...0,45	≤0,8	≤0,8	≤0,025	≤0,025

Через високу концентрацію хрому виникають такі недоліки, як понижена зварюваність, схильність до хрупкості, поява холодних тріщин. Причиною є особливість фазового стану високохромистих сталей та особливості структурних та фазових перетворень, які виникають при нагріві та охолодженні.

Наприклад після обробки загартуванням утворюється підвищена хрупкість, що призводить до ускладнення технології обробки.

Також після обробки цементацією мартенситні сталі схильні до утворення холодних тріщин, це спричинено підвищенням вмісту вуглецю в хімічному складі матеріалу.

Високохромисті конструкційні сталі застосовуються для виробництва більшості сучасних деталей приладів, елементів конструкцій і технологічного інструменту.

Більшість виробів з високохромистих сталей працюють в агресивних умовах під дією циклічних навантажень а також абразивних частинок.

Отже максимальне навантаження та інтенсивний знос локалізовані на поверхню робочого шару деталі.

В зв'язку з цим актуальним являється задача поверхневого зміцнення високохромистих конструкційних сталей за рахунок зміни властивостей тільки робочої їх частини.

2.2. Особливості процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування

Йонно-плазмове термоциклічне азотування –хіміко-термічний метод зміцнення поверхонь деталей в парофазовому середовищі для надання високої твердості, корозійної стійкості, зносостійкості [32-34].

Йонне азотування застосовують для обробки різних типів сталей і сплавів: інструментальних, мартенсито-старіючих сталей, корозійно-стійких, хромистих і хромнікелієвих сталей, чавунів та інших.

Якість і властивості поверхневого шару деталей, що азотуються залежать від ряду факторів: ступені розрядження газового середовища, напруги між електродами, тривалості процесу, робочої температури, взаємного розміщення деталей та електродів.

Технологія поверхневого зміцнення деталей заснована на дискретному введенні енергії та зміні напружено-деформованого стану поверхні, за рахунок чого пришвидшується процес дифузії, що призводить до скорочення часу обробки [32-34].

Процес іонного азотування в плазмі тліючого розряду реалізується в дві стадії:

- 1 - очистка поверхні катодним розпиленням;
- 2 – насичення поверхні азотом.

Під час першої стадії відбувається активація поверхні та руйнування окисної плівки. Друга стадія забезпечує нагрів поверхні до температури дифузії, активність газової фази, підтримка градієнту та концентрації азоту в сталі, регулювання процесу по фазовому складу дифузійного шару.

Катодне розпилення проводиться протягом 5...60 хв, в залежності від забруднення поверхні деталі, при напрузі 1100...1400 В та тиску 20...35 Па. Під час катодного розпилення температура поверхні деталі не перевищує 250 °С [9].

В розрідженому середовищі, що містить азот, між катодом (деталлю) та анодом збуджується тліючий розряд, йони газу, бомбардують поверхню катода, нагрівають її до температури насичення.

Температура азотування 490...560 °С, розрідження 60...90 Па, робоча напруга коливається від 600 до 700 В, тривалість процесу складає від 12 до 32 год. (залежить від товщини шару матеріалу, що оброблюється) [33].

2.3. Устаткування для формування поверхневого шару матеріалу методом йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування виконується на спеціальному обладнанні.

Якість і властивості сформованого покриття деталей, що азотуються залежать від ряду факторів, які в процесі обробки потрібно контролювати та регулювати.

Модифікація поверхневого шару деталі методом йонно-плазмового термоциклічного азотування реалізується за допомогою установки, яка дозволяє контролювати робочий тиск, температуру, ступінь розрідження та об'єм газової суміші (рис.2.1) [35-36].

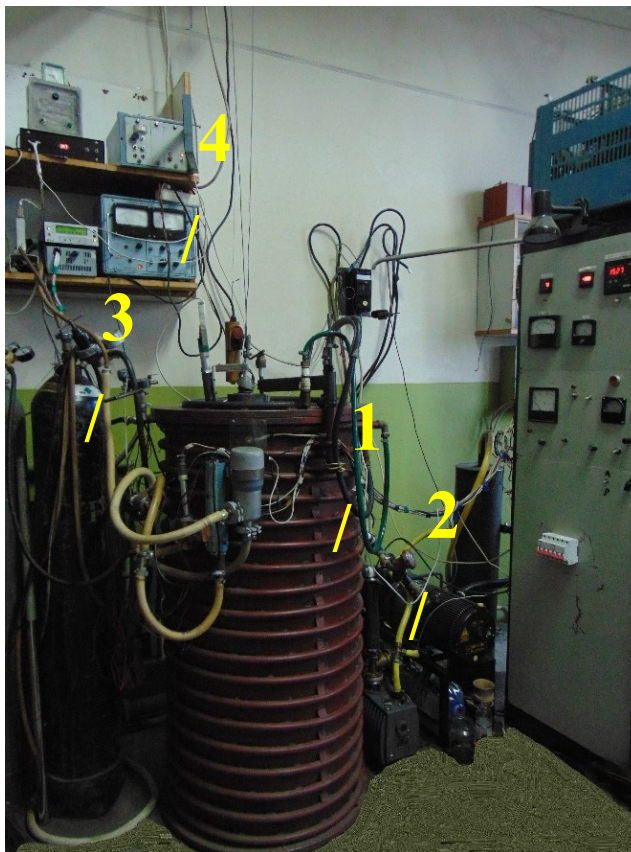


Рис. 2.1. Загальний вигляд установки йонно-плазмового термоциклічного азотування: 1 – вакуумна камера; 2 – система вакуумування; 3 – система постачання газової суміші; 4 – система контролю температури.

Обробка деталі проводиться в вакуумній камері, до якої підключено системи вакуумування, постачання газової суміші, контролю температури, за допомогою яких відбувається контроль та регулювання робочої температури, тиску, та дозування газової суміші під час процесу хіміко-термічної обробки.

На рисунку 2.2 показана схема установки йонно-плазмового термоциклічного азотування, яка складається з вакуумної камери – 1, система вакуумування – 2, система постачання газової суміші – 3, система контролю температури – 4.

Вакуумна камера – це герметичний контейнер, який призначений для встановлення деталей та підключення всіх систем, необхідних для реалізації обробки азотуванням (рис.2.3) [37].

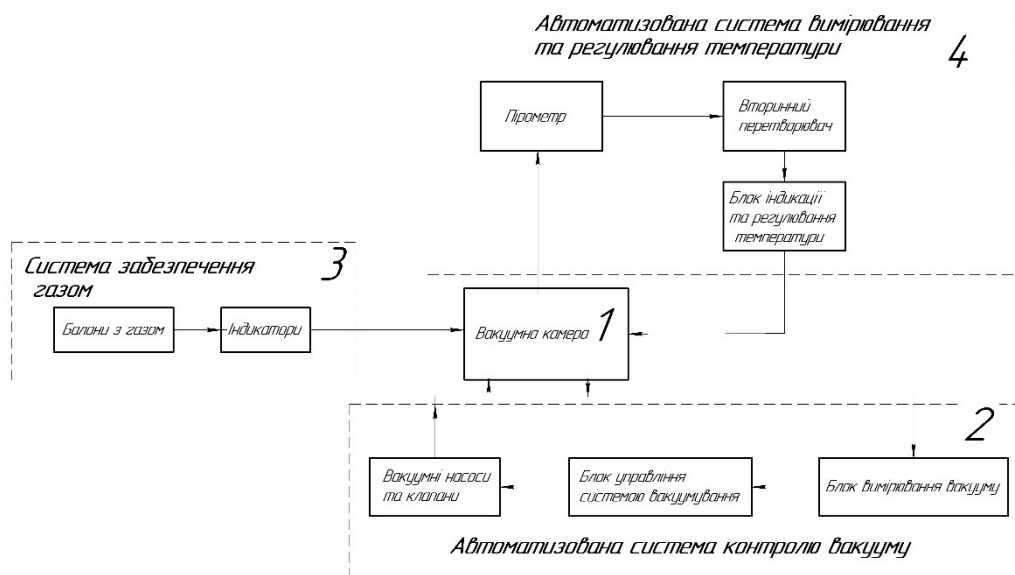


Рис. 2.2. Схема установки йонно-плазмового термоциклічного азотування: вакуумна камера: 1 – вакуумна камера; 2 – система вакуумування; 3 – система постачання газової суміші; 4 – система контролю температури.

Вакуумна камера складається з корпусу, кришки, підвіса для встановлення деталей, змійовика та отворів для підключення систем вакуумування, забезпечення газом та контролю температури.



Рис. 2.3. Вакуумна камера

Корпус виконано із нержавіючої сталі, для охолодження корпусу встановлено змійовик, по якому циркулює холодна вода, деталь встановлюється на спеціальну оснастку, яка підключена до негативного заряду через гермоввод, для контролю температури технологічного процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування на корпусі кришки встановлено віконечко.

Система вакуумування призначена для контролю та регулювання параметрів вакууму в процесі обробки показана на рисунку 2.4 [38]. До системи вакуумування входять: манометричний перетворювач лампа – ПМТ-2 (1), вакуумметр йонізаційний-термопарний – ВІТ- 2 (2),

датчик Пірані –APGX-L (3), вакуумметр –ADC-71 (4), ступінчасто-імпульсний перетворювач – СІП (5), електро-моторний редуктор - ЕМ редуктор (6), вакуумний насос - 2НВР-5ДМ (7), сильфонний кран (8), вакуумна камера (9).

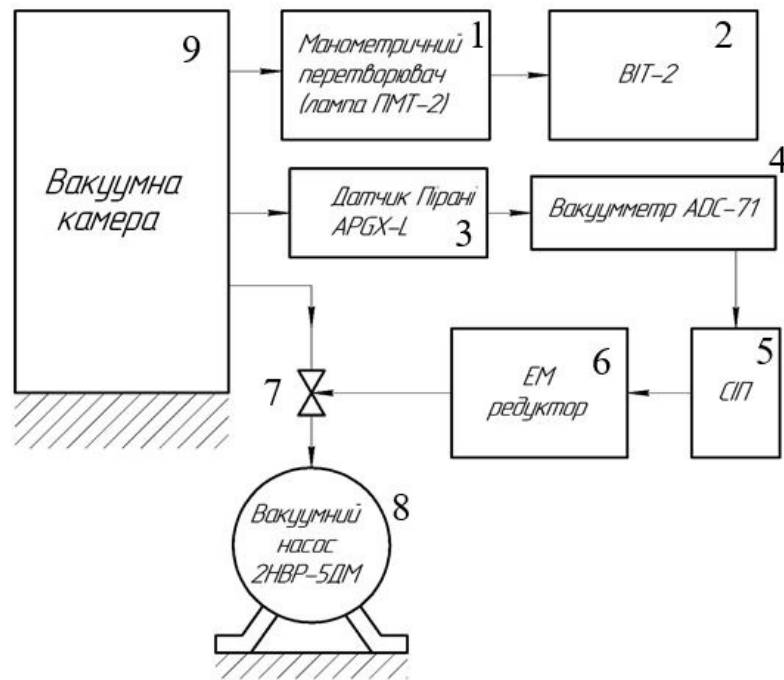


Рис. 2.4. Система контролю робочого тиску [38]:

1 – манометричний перетворювач лампа – ПМТ-2; 2 – вакуумметр йонізаційний-термопарний – ВІТ- 2; 3 – датчик Пірані –APGX-L; 4 – вакуумметр –ADC-71; 5 – ступінчасто-імпульсний перетворювач – СІП; 6 – електро-моторний редуктор - ЕМ редуктор; 7 – сильфонний кран, 8 –вакуумний насос - 2НВР-5ДМ; 9 – вакуумна камера.

Вакуумний насос (8) призначений для створення та підтримки необхідного робочого тиску у вакуумній камері (9) під час технологічного процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Контроль показників вакууму відбувається через манометричний перетворювач (1) та вакуумметр йонізаційний-термопарний (2).

Принцип контролю робочого тиску заснований на тому, що теплопровідність розрядженого газу прямо пропорційна його тиску (чим вище вакуум, тим менше теплопровідність газу), відповідно до цього температура провідника підвищується.

Манометричний перетворювач (1) являється датчиком і з'єднаний трубкою з вакуумною камерою (9).

Вакуумметр йонізаційний-термопарний (2) призначено для оцінки сигналів датчика, перерахунку його в одиниці тиску, а також для відображення показників у зручній для спостерігача формі.

Для автоматизованого контролю вакууму використано датчик Пірані (3). Робочий діапазон датчика від 0,5 Торр до 10^{-4} Торр.

З датчика (3) сигнал поступає на вакуумметр ADC-71 (4). На табло вакуумметра (4) встановлюються технологічні параметри вакууму (верхня та нижня межа робочого тиску). При виході параметрів за встановлені межі подається сигнал на ступінчато-імпульсний перетворювач (5).

Через інерційність системи зміни вакууму встановлено затримку на спрацювання поворотного крану, яка регулюється ступінчато-імпульсним перетворювачем (5).

Для автоматизованого регулювання відкачування суміші газів із камери встановлено електромоторний редуктор (6), за допомогою якого регулюється поворот сильфонного крану (7).

Для регулювання об'єму газової суміші у вакуумній камері запатентовано систему забезпечення газом (рис. 2.5) [39].

До системи входять два балони з газом (1), два регулятори витрат газу – УР-6-ДМ (2), два натікачі – LV10R (3), датчик витрат газу – PFMV 505- 1 (4), блок індикації (5).

Подача газу відбувається через регулятор витрат газу (2), після чого газова суміш подається на натікач (3), який призначений для плавного регулювання потоку газу, для контролю витраченого об'єму газу встановлено датчик витрат газу (4), з якого поступає сигнал на блок індикації (5), який призначений для відображення параметрів у зручній для людини формі.

Важливим параметром йонно-плазмової хімікотермічної обробки є контроль температури обробки. Для контролю температури запропоновано систему контролю температури [40].

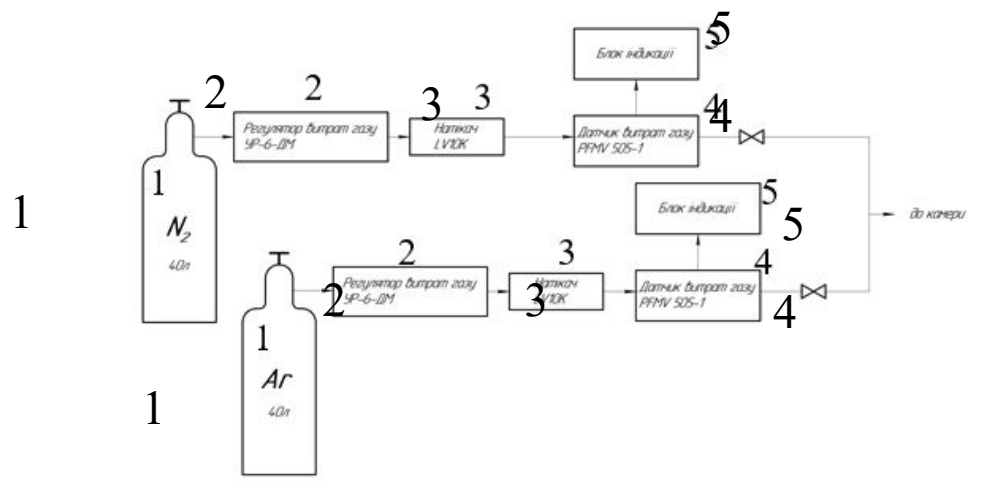


Рис. 2.5. Система забезпечення газом: 1 – балон з газом; 2 – регулятор витрат газу; 3 – натікач; 4 – датчик витрат газу; 5 – блок індикації.

Система контролю температури (рис.2.6) складається з пірометра ППТ131-01 (1), вторинного перетворювача - ПВ-6 (2) та блоку керування (3).

За допомогою пірометра вимірюється температура азотування, дані вимірів передаються на вторинний перетворювач (ПВ-6), на якому попередньо встановлюється верхня та нижня межа температури обробки деталі під час йонно-плазмового термоциклічного азотування, з вторинного перетворювача сигнал поступає на блок керування.

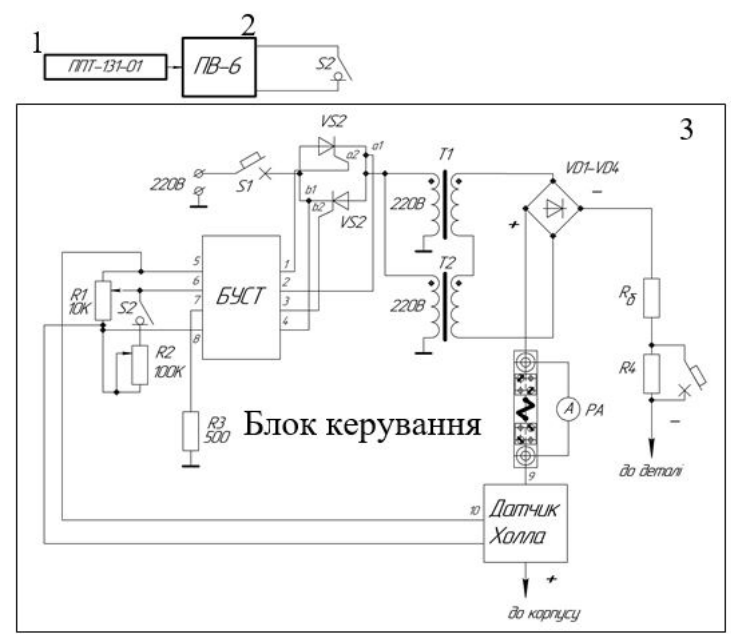


Рис. 2.6. Система контролю температури. 1 – пірометр – ППТ 131-01; 2 – вторинний перетворювач – ПВ-6, 3 – блок керування.

Сигнал з датчика Холла поступає на блок керування симисторами та тиристорами, з якого відбувається регулювання відкриття тиристорів, потім сигнал поступає на трансформатори, з яких подається напруга, через діодний міст, на деталь та корпус.

2.4. Підготовка виробів до йонно-плазмового термоциклічного азотування

Підготовка експериментальних зразків до йонно-плазмового термоциклічного азотування здійснюється в декілька етапів:

- очистка заготовок;
- знежирення;
- депаствація поверхні.

Для уникнення дефектів поверхневого шару матеріалу перед азотуванням поверхонь деталі потрібно очистити від мастила, емульсії та інших забруднень. Для видалення забруднень та знежирення поверхонь застосовують електрохімічний метод, промивку в бензині або будь-яких інших розчинниках.

При обробці корозійностійких сталей потрібно провести попередню обробку для видалення окисної плівки, котра перешкоджає дифузії азоту в матеріал.

Азотування високохромистих сталей без попередньої депасивації призводить до зниження глибини азотованого шару матеріалу та до нерівномірного розміщення його по поверхні деталі. В результаті твердість поверхневого шару є нерівномірною [24, 34, 41].

Видалення окисної плівки проводиться травленням в водних розчинах кислот або введенням в робочий простір хлоридного амонію або чотирехлористого вуглецю.

Після травлення вироби потрібно промити спочатку гарячою водою при температурі 40-50⁰ С, потім холодною проточною водою до зникнення темного нальоту, котрий з'явився при травленні. Після чого просушити при температурі 100...110⁰ С або обдути гарячим повітрям.

2.5. Послідовність обробки деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування

Для реалізації методу йонно-плазмового термоциклічного азотування необхідно виконати певну послідовність дій:

- встановити деталі в вакуумну камеру;
- задати параметри обробки;
- підключити живлення;
- герметизувати вакуумну камеру.

Перед встановленням деталей в вакуумну камеру потрібно захистити поверхні деталей, які не потребують обробки.

Також слід пам'ятати, що при встановленні деталей, поверхні, які контактують з іншими поверхнями виробів не піддаються азотуванню і після обробки поверхневий шар деталі залишається без змін.

Обробка деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування в декілька етапів (рис. 2.7).

Важливим етапом виконання обробки азотуванням є встановлення параметрів процесу азотування на пульті керування та вторинному перетворювачі.

Встановлюються такі параметри як: об'єм газу, який постачається, напруга, температура азотування, тиск.

Наступним етапом є підключення деталі та корпусу до живлення. Плита, на яку встановлюється деталь, підключена до негативного заряду через гермоввод, а корпус - до позитивного заряду.

Після встановлення деталі та підключення до електродів герметизують камеру і відкачують повітря до тиску 3 Па, після чого накачують газ до 20...35 Па.

Для збудження тліючого розряду плавно подається напруга на електроди. Напруга збільшується від 0 до 500 В. Під час збільшення напруги відбувається катодне розпилення, очищення деталі від окисної плівки та нагрів до робочої температури 490...560 °C[34-35].

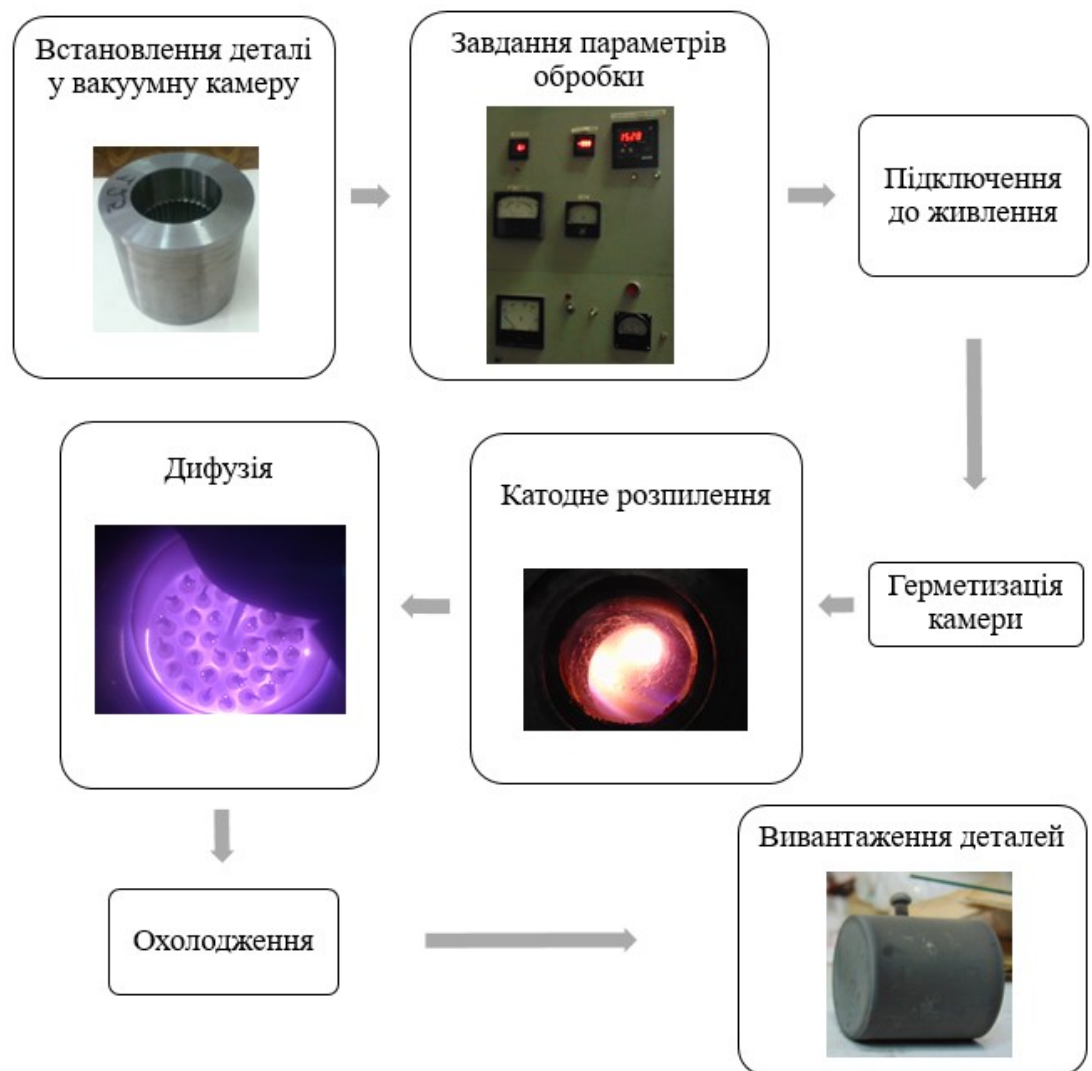


Рис. 2.7. Етапи обробки методом йонно-плазмового термоциклічного азотування

Швидкість нагріву залежить від поверхні і маси деталі, зазвичай тривалість даного етапу від 15 хв до 120 хв.

Після обробки поверхні режимом катодного розпилення напругу підвищують до робочої – 600...800 В, а тиск підвищують до 60...90 Па [34-35].

При підвищенні тиску зменшується протяжність катодного свічення, котре рівномірно розподілене по деталі, та повторює її контури.

На цьому етапі відбувається насичення поверхні деталі атомами азоту. Тривалість процесу від 12 до 32 год. (залежить від товщини шару матеріалу, який оброблюється).

Після завершення обробки відключається подача газу, та проводиться охолодження деталей у вакуумі.

Охолодження деталей відбувається у вакуумній камері для уникнення появи дефектів поверхні деталі.

Після охолодження деталі відвантажуються.

2.6. Методика дослідження мікротвердості та мікроструктури поверхні

Дослідження мікротвердості поверхні азотованої деталі сформованої йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням виконували за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 (рис. 2.8).

Вимірювання мікротвердості матеріалів здійснюють за методом відновленого і невідновленого відбитків, регламентованих ISO 6507 та ISO 14577 відповідно, а також ГОСТ 9450-76. Метод заснований на вдавлюванні алмазної піраміди в покриття з подальшим виміром глибини відбитка.

При дослідженні мікротвердості деталей, сформованої йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням, піддавали навантаженню 25-100 гр. згідно ГОСТ 9450-76.

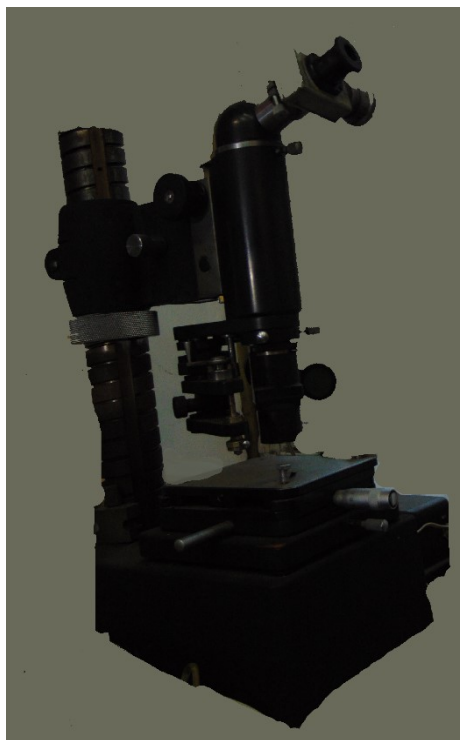


Рис. 2.8. Мікротвердомір ПТМ-3

Визначення мікротвердості виконувалось в такому порядку:

1. За допомогою лапки закріпити деталь на робочій поверхні мікротвердоміра так, щоб поверхня, яка досліджується була паралельною до робочої площини стола.

2. Встановити тягарець.

3. Вибрати місце для виконання відбиття алмазної піраміди. При досліджуванні металічного предмету відстань від центру відбитка до краю деталі або між центрами сусідніх відбитків не має перевищувати дві діагоналі відбитку.

4. Плавню повернути предметний столик проти годинникової стрілки до упору. Закріпити столик в такому положенні.

5. Опустити шток з алмазною пірамідою до поверхні деталі. Витримати навантаження протягом 5 секунд й повернути у вихідне положення.

6. Провести виміри діагоналі відбитку за допомогою окуляр-мікрометра.

Похибка показників мікротвердості складає 8...10%. Середнє значення мікротвердості визначається за результатами декількох вимірів.

Коефіцієнт поверхневого зміцнення деталі методом йонно-плазмового термоциклічного азотування визначається за формулою [19] :

$$K_y = \frac{H_{\mu}^I}{H_{\mu}^O}, \quad (2.)$$

де H_{μ}^I , H_{μ}^O - мікротвердість покриття і основи відповідно.

Дослідження мікротвердості поверхні азотованої деталі виконували за допомогою металографічного мікроскопа МІМ-10 (рис. 2.9), призначеного для дослідження мікроструктур металів та інших непрозорих об'єктів в світлому полі при прямому і косому освітленні, а також в темному полі і в поляризованому світлі.

За допомогою мікроскопа МІМ-10 проводились дослідження структурного складу оброблених зразків, використовуючи напівавтоматичний інерціальний пристрій.



Рис. 2.9. Мікроскоп МІМ-10

Для дослідження мікроструктури зразки необхідно закріпити за допомогою лапок на робочій поверхні устаткування. Відрегулювати освітлення об'єкту за допомогою діафрагм.

Виділити необхідну ділянку для дослідження та відцентрувати діафрагму за допомогою гвинтів.

Щоб зафіксувати зображення на фотопластинку потрібно вставити фотопластинку в мікроскоп, та натиснути кнопку на пульті керування.

2.7 Статистична обробка експериментальних даних

Статистична обробка експериментальних даних здійснюватиметься за допомогою методу групового врахування аргументів.

Метод групового врахування аргументів призначений для обробки експериментальних даних, та отримання залежності одного параметра від інших. В якості опорної функції використовується поліном Колмогорова-Габора.

На рисунку 2.10 зображений загальний алгоритм реалізації методу.

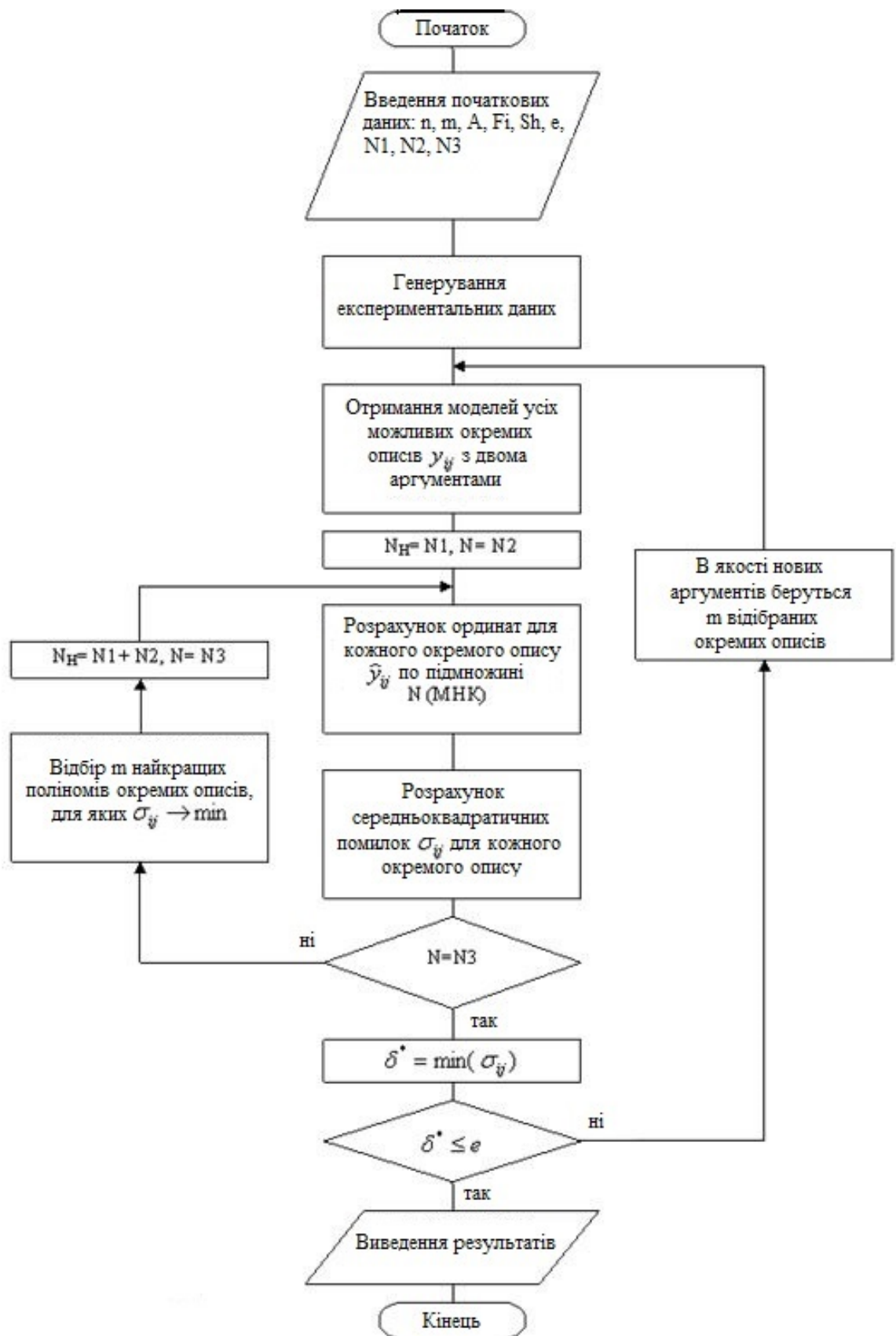


Рисунок 2.10 Блок-схема багаторядного алгоритму МГВА.

Вибірку результатів експериментів поділяють на дві частини.

Перша вибірка використовується для визначення коефіцієнтів, друга для визначення похибки.

Збільшуючи порядок ітерації зменшується похибка обрахування, проте досягнувши певного рівня складності, похибка починає збільшуватись [42-43].

Пошук рішення призводить до отримання рівняння першого порядку (2.1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{nm}x_nx_m, \quad (2.1)$$

де y – параметр оптимізації, $x_1 - x_n$ - параметри обробки;

$b_1 - b_n$ – коефіцієнти.

Метод групового врахування аргументів відтворює схему масової селекції.

Вхідні аргументи і проміжні змінні сполучуються попарно і складність комбінацій на кожному ряді обробки інформації зростає, доки не буде отримана єдина модель оптимальної складності.

Реалізація методу МГВА відбувається за допомогою програми, наведеної в додатку А.

Програма розроблена на мові Pascal ABC.NET, об'єм зайнятої пам'яті на диску програмою становить 9,73 КБ, а після запуску створюється файл з розширенням exe. який займає 645 байт.

Для того, щоб реалізувати метод потрібно провести ряд експериментів, результати яких занести до текстового файлу.

Після запуску програми відбувається зчитування даних та генерація можливих моделей. З кожною ітерацією складність моделі підвищується.

Для вибору оптимальної моделі використовують критерій регулярності.

Критерій регулярності обраховується після отримання моделі, та порівнюється з попереднім. В результаті розрахунку вибирається та модель, критерій регулярності якої найнижчий.

Ця модель вважається оптимальною моделлю опису процесу. Вихідні данні записуються у файл, який вказує користувач.

Висновки.

Для дослідження поверхневого зміцнення деталей приладів методом йонно-плазмового термоциклічного азотування обрано конструкційну високолеговану, корозійностійку, жароміцну сталь 40X13.

Формування поверхневого шару на експериментальних зразках виконували на спеціальній установці методом йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Для дослідження параметрів мікротвердості та макроструктури сформованого покриття використовували мікротвердомір ПТМ-3 та металлографический мікроскоп МІМ-10.

Розроблена програмна реалізація методу нечіткого врахування аргументів для статичної обробки експериментальних даних методом групового врахування аргументів.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ

3.1. Модель процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування

Йонно-плазмове термоциклічне азотування відноситься до технологій, які реалізуються за допомогою використання електричного розряду в газовому середовищі в якості інтенсифікатора процесу.

Під час азотування в тліючому розряді атоми заліза в плазмі тліючого розряду з'єднуються з азотом утворюючи нітриди заліза.

Вони в свою чергу під впливом бомбардування зарядженими частинками рухаються по напрямленню до катода, адсорбуються поверхнею.

Після чого під дією бомбардування поверхні падаючим потоком нітриди видозмінюються, повільно перетворюючись з ϵ -фази в γ' -фазу, при цьому атомарний азот утворює розчин α -фази і дифундує в глибину поверхні [4, 13].

Таким чином, утворення азоту в поверхневому шарі деталі обумовлене не тільки потраплянням з газового середовища, а й в результаті видозміни нітридів, а рушійною силою процесу є високий градієнт концентрації азоту.

Формування азотованого шару при йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні відбувається в термодинамічному середовищі з нерегульованим хімічним потенціалом.

Утворення йонів і їх переміщення до поверхні насичення зосереджені в ділянці катодного падіння потенціалу (0,5...0,2 мм).

Через це виникає складність аналізу газової атмосфери в прикатодній ділянці.

Актуальною задачею являється дослідження взаємодії насичуючого середовища з оброблюваною поверхнею.

При йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні взаємодія відбувається в умовах з нерегулярним хімічним потенціалом і супроводжується наступними процесами [13]:

- відновленням йонів азоту на поверхні катоду;
- адсорбцією поверхнею деталі йонів азоту з утворенням нітридів заліза;
- дифузією атомів азоту в поверхню деталі.

Під час обробки на поверхні метала утворюється велика кількість вільних зв'язків, тому поверхневий шар володіє підвищеними реакційними властивостями.

В той же час поверхня піддається йонному бомбардуванню з газового середовища, під час якої відбувається нагрів деталі, катодне розпилення, процес сорбції, депасивація тощо.

Бомбардування поверхні надає адсорбованим атомам додаткову енергію, яка в комбінації з високою концентрацією азоту забезпечує високу швидкість утворення поверхневих шарів.

Нагрів поверхні в процесі йонно-плазмового термоциклічного азотування відбувається за рахунок кінетичної енергії йонів і перетворенням її більшої частини в теплову енергію, яка впливає на формування функціональних покриттів, оскільки процес дифузії активується за допомогою термічного впливу, важливим параметром, який впливає на формування поверхневого шару є температура обробки.

На рисунку 3.1 зображено модель процесів, які протікають на поверхні катода при азотуванні в тліючому розряді.

Під дією енергії електростатичного поля йони легуючого елементу прискорюються та рухаються в напрямленні до катоду (оброблюваної поверхні).

В результаті чого йони з високою кінетичною енергією потрапляють на поверхню оброблюваної деталі.

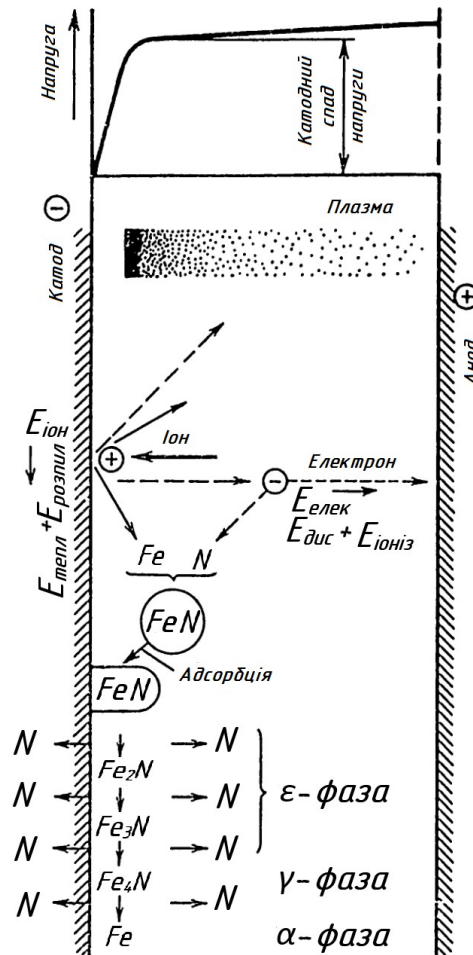


Рисунок.3.1. Процеси на поверхні катода та анода при йонному азотуванні сталей [1].

Відбувається бомбардування деталі, що призводить до пасивації поверхні та нагріву деталі до необхідної температури обробки. За допомогою джерела електричної енергії регулюється температура нагріву поверхні.

Наступним етапом насичення є з'єднання атомів заліза з азотом утворюючи нітриди заліза, які в свою чергу адсорбуються на поверхні деталі, утворюючи рівномірний шар.

Концентрація азоту в поверхневому шарі коливається від 6 до 15% по масі.

Під впливом йонного бомбардування напильний шар видозмінюється ($\text{FeN} \rightarrow \text{Fe}_3\text{N} \rightarrow \text{Fe}_4\text{N}$) та переходить в різні фази ($\epsilon \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$) [17].

При розпаді нітриду заліза утворюється азот, який дифундує в поверхневий шар деталі, а залізо знов дифундує в плазму.

Цей процес має циклічний характер, тому концентрація нітридних фаз, які утворюються на поверхні катоду є самостійними джерелами азоту.

3.2. Процеси, які виникають при йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні.

Модифікація поверхонь металевих виробів за допомогою йонно-плазмового термоциклічного азотування дозволяє реалізувати концепцію керування результатами обробки в залежності від вимог експлуатації.

Перспективною є модель процесу, в якій головним фактором формування падучого на деталь потоку є елементарні підпроцеси в області катодного падіння напруги електричного розряду в газовому середовищі.

При концентрації частинок в газовому середовищі $n < 10^{13}$ см⁻³ переважають процеси радіаційної рекомбінації, при збільшених концентраціях, приблизно $n > 10^{17}$ см⁻³ основними є явища ударної рекомбінації. Дисоціативна рекомбінація виникає в низькотемпературній плазмі [9, 17].

Для визначення типу рекомбінаційних явищ розглянемо стан йонізованого газового середовища, при тиску $P=1$ торр і температурі $T=500^{\circ}\text{C}$ концентрація частинок в газовому середовищі визначається за формулою (3.1) [1]:

$$n = 9,658 \cdot 10^{18} P/T = 1,25 \cdot 10^{22} \quad (3.1)$$

Густина електронно струму на межі області катодного падіння напруги визначається за формулою (3.2) [17]:

$$j_{ec} = q_e n_{e\delta} V_{se\delta}, \quad (3.2)$$

де q_e – заряд електрона, $q_e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ А · с; $n_{e\delta}$ – концентрація електронів на межі області катодного падіння напруги; $V_{se\delta}$ – швидкість дрейфу електронів під впливом поля на межі області катодного падіння напруги.

Рухомість електронів на межі області катодного падіння напруги визначається за формулою (3.3) [9, 17]:

$$\mu_{e\delta} = q_e / m_e \bar{V}_e C_p P \sigma_{vce}, \quad (3.3)$$

де m_e – маса електрона, $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг; $\bar{V}_e$ – середня швидкість електрона на межі області катодного падіння напруги; C_p – константа концентрації компонента; σ_{vce} – площа зіткнення електронів з частками газу, в газовому середовищі, де переважає молекулярний азот, $\sigma_{vce} = 11,32 \cdot 10^{-20}$ м².

Константа концентрація компонента розраховується за формулою (3.4) [29]:

$$C_p = 1/kT \quad (3.4)$$

де k – константа Больцмана, $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура газового середовища, $T=500^\circ\text{C}$.

При вказаних параметрах константа концентрації компонента дорівнює $9,368 \cdot 10^{-19}$ с²/кг·м².

Отже враховуючи всі формули рухомість електронів при вибраних умовах $\mu_{e\delta} = 209,8$ м²/В·с.

Визначимо швидкість дрейфу електронів (3.5), прийнявши напруженість поля на межі області катодного розпилення за $E(\delta) = 100$ В/м.

$$V_{se\delta} = \mu_{e\delta} E(\delta) = 2,098 \cdot 10^4 \text{ м/с} \quad (3.5)$$

Розрахуємо концентрацію частинок (3.6) на межі області катодного падіння напруги при густині струму – 10...20 А/м².

$$n_{e\delta} = j_{ec} / q_e V_{se\delta} = (0,0297 \dots 0,0595) \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3} \quad (3.6)$$

Отже концентрація частинок при тиску $P=1$ торр і температурі $T=5000^\circ\text{C}$ більша за 10^{17} см⁻³, отже виникає ударна рекомбінація, так як для інших видів немає задовільних умов.

3.3. Математична залежність товщини поверхневого зміцнення від параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Процес йонно-плазмового термоциклічного азотування являється багатofакторним процесом.

Основними факторами цього процесу є: склад газового середовища, тиск насичуючого середовища, температура, тривалість обробки, електричні характеристики, відстань між електродами.

Кінцевим результатом технологічного процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування являється створення дифузійного шару з визначеними параметрами фазового складу та товщини.

Визначити товщину функціонального покриття можна за формулою [17, 28]:

$$h = D\sqrt{\tau}, \quad (3.7)$$

де h – товщина поверхневого шару, τ – тривалість процесу, D – ефективний коефіцієнт дифузії.

Ефективний коефіцієнт дифузії враховує процеси, які відбуваються в насичуючому середовищі та поверхневому шарі деталі. Він враховує наступні характеристики:

- фазовий склад металу при температурі обробки;
- процеси, які виникають на поверхні деталі та ступінь їх стабільності в умовах проведення процесу;
- зміну реакційної здатності катоду в процесі насичення.

Аналіз впливу тиску на ефективний коефіцієнт дифузії показав, що існує оптимальна величини тиску, як для α – твердого розчину, так і для формування ϵ та γ фаз.

При цьому оптимальна величина тиску, яка забезпечує найбільшу активність насичуючого середовища, в умовах стійкого горіння тліючого розряду знаходиться в взаємозв'язку з відстанню між електродами d [28].

$$\frac{P}{d} = \text{const} = K_1, \quad (3.8)$$

Вираз (3.8) має обмеження, які виникають при існуванні тліючого розряду.

Тобто режим стійкості самоорганізації виникає і в умовах, коли виникають відхилення від заданих параметрів обробки.

Тобто при великому тиску, в результаті якого тліючий розряд переходить в дуговий, при великих відстанях між електродами, що спричиняє пробій, а також при мінімальній відстані між електродами (довжина вільного пробігу частинок), тліючий розряд не формується.

При йонному азотуванні деталей і інструментів складної конфігурації (наприклад, шнеків, зубчатих коліс, фрез, гвинтів тощо) рекомендується підвищити робочий тиск, для забезпечення рівномірного утворення азотованого шару на поверхні деталі.

В цьому випадку використовують формулу [28]:

$$P \cdot l = \text{const} , \quad (3.9)$$

де P – величина тиску; l – товщина катодного простору.

Для визначення впливу параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування (тривалості обробки, робочого тиску, температури обробки) на результати обробки (товщини азотованого шару) використано метод математичного моделювання – метод групового врахування аргументів (розділ 2, параграф 2.8.) [42].

Факторами варіювання вибрано: тривалість обробки, робочий тиск, температура обробки. В якості параметру оптимізації вибрано товщину азотованого шару.

Пошук рішення призводить до отримання рівняння першого порядку (3.10):

$$y = b_0 - b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (3.10)$$

де y – товщина нітридного шару, x_1 – робочий тиск (Мікроторр); x_2 – температура обробки ($^{\circ}\text{C}$); x_3 – тривалість обробки (год). b_0 – b_{123} – коефіцієнти.

Отже, за допомогою методу групового врахування аргументів, визначали вплив параметрів обробки на формування поверхневого шару.

Висновки.

1. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, які виникають при йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні.
2. Запропоновано математичні залежності визначення типу рекомбінаційних явищ при йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні.
3. Розроблено математичну залежність товщини поверхневого зміцнення від параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ

4.1. Експериментальні дослідження.

Для оцінки впливу технологічних параметрів на властивості поверхневого шару деталей приладів проведено експериментальні дослідження процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування

Експериментальні дослідження процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування при формуванні зміцнених покриттів деталей із сталі 40X13 проводили в розрідженому середовищі, яке містить азот.

Між катодом (деталлю) і анодом збуджується тліючий розряд, йони газу, бомбардуючи поверхню виробу, нагрівають її до температури насичення.

Інтенсифікація процесу при йонному азотуванні пояснюється впливом тліючого розряду на всі елементарні процеси, які сприяють утворенню функціонального покриття: активація газової фази, адсорбція і дифузія.

Для експериментальних досліджень виготовляли спеціальні зразки, які розподіляли на три партії.

Першу партію експериментальних зразків оброблювали за режимами, представленими в таблиці 4.1.

Азотування зразків проводили в суміші газів - азоту (40%) і аргону (60%).

Технологічні режими обробки:

- тиск змінювався в межах від 0,6 до 1,8 Торр,
- температура – 500...640 °С,
- час обробки складав 3 години.

Як показали експериментальні дослідження зразки першої партії характеризуються неоднорідністю шару, що спричинене невеликою тривалістю обробки поверхні.

Таблиця 4.1.

**Режими йонно-плазмового термоциклічного азотування та властивості
поверхневого шару першої партії.**

№ Режи му	Режим			Товщина зони азотованого шару, мкм		Мікротве рдіст¹⁾ Н/мм²	Нотатки
	Тиск Р, Торр	Темпера тура Т, °С	Час, год	Сіра фаза	Нітридна зона		
1	0,6	580	3	36-38 15-16	3-5 2	5360/ 10280/ 10170	
2	1,8	580	3	30-35 40-42	2-3 2-4	4810/ 4290/ 4510/	Несуцільний шар
3	0,6	500	3	-	0	3450/ 4390/ 2520	Несуцільний шар
4	0,9	540	3	- 15-17	2-3 2-3	4390/ 4390/ 4420	Шар на 20% ²⁾ Шар на 70 %
5	0,6	620	3	47 47-50	3-4 3	11850/ 6170/ 9120	
6	0,9	600	3	45-47 21-25	2-3 2-3	4330/ 4910/ 12870	Шар на 80% Шар на 50%
7	0,65	580	3	9-11 18-20	2-4 2-4	4360/ 4270/ 3730	Шар на 70% Шар на 80%
8	0,8	560	3	2-4 -	1 0	3870/ 5310/ 5310	Шар на 50%
9	0,7	640	3	75-80 45-46	2-4 3-4	3060/ 8310/ 11780	100%,
10	0,7	600	3	68-75 15-20	2-3 3-4	1500/1750 /1600	
Примітки: 1) Результати виміру мікротвердості в трьох точках оброблюваної поверхні; 2) Відсоток поверхні з нітридним шаром.							

Поверхня зразків вкрита сірою фазою, товщиною до 70 мкм.

Сіра фаза утворилась в результаті адсорбції поверхні йонів азоту.

В сформованому шарі наявна нітридна зона, утворена в результаті дифузії азоту в поверхню деталі, яка складає до 5 мкм.

За результатами експериментів побудовано залежності мікротвердості поверхні, сірої фази та нітридної зони від робочої температури та тиску.

На рисунку 4.1 показано залежність мікротвердості від робочого тиску та температури. З графіка видно, що максимальна мікротвердість виникає при тиску 0,6 Торр та температурі 580...620 °C.

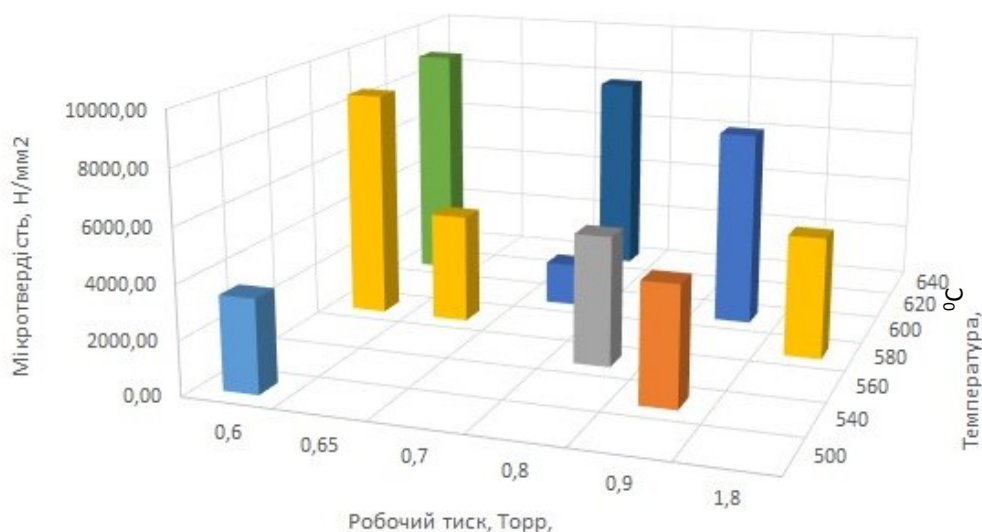


Рис. 4.1. Залежність мікротвердості від температури та тиску.

На рисунку 4.2. показано залежність товщини сформуваної сірої фази від робочої температури та тиску.

З діаграми видно, що найбільша товщина сірої фази утворюється при температурі 640 °C та тиску 0,7 Торр.

Як показали експериментальні дослідження при температурі 500 °C та тиску 0,6 Торр утворення сірої фази не відбувається.

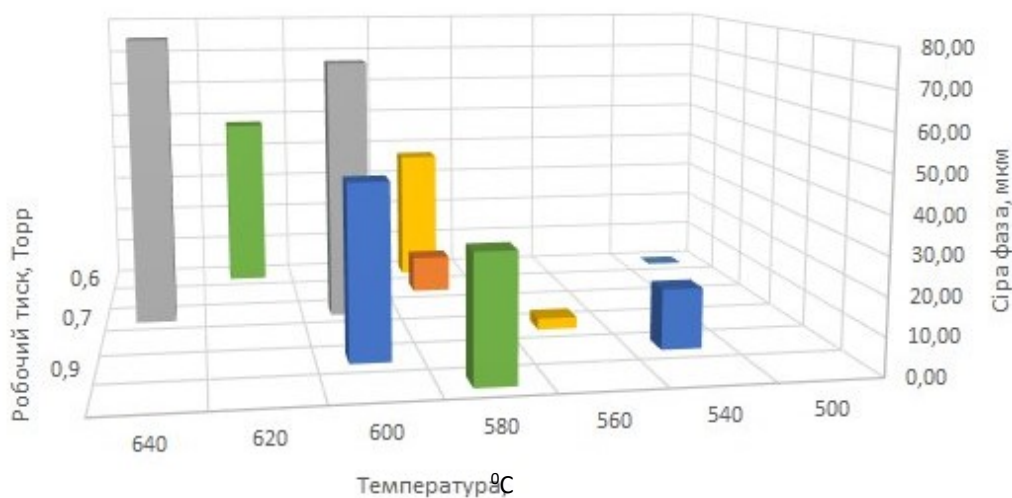


Рис. 4.2. Залежність товщини сірої фази від температури та тиску.

На рисунку 4.3 показано залежність товщини сформованої нітридної зони від робочої температури та тиску.

З діаграми видно, що найбільша товщина нітридної зони утворюється при температурі 580 °C та тиску 0,6 Торр.

Як показали експериментальні дослідження при температурі 500 °C та тиску 0,6 Торр не відбулось утворення нітридної зони.

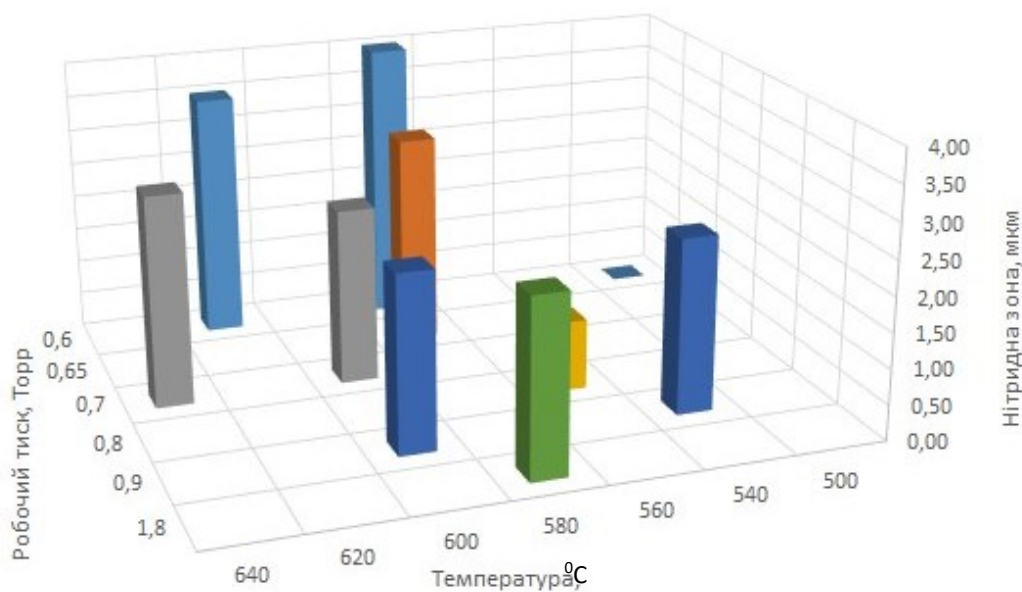


Рис.4.3. Залежність товщини нітридної зони від температури та тиску.

З діаграм представлених на рисунках 4.1-4.3 видно, що при обробці за режимом № 3 не відбувається утворення сірої фази та нітридної зони, поверхнева рекристалізація відбулась через локальний перегрів поверхні.

Для збільшення глибини дифузії атомів азоту прийнято рішення проводити обробку в два та три ступені, збільшити час та температуру обробки, а також змінити склад середовища.

Другу партія експериментальних зразків оброблювали за режимами, представленими в таблиці 4.2.

Параметри обробки змінювали з часом, збільшували тиск та температуру.

Тиск змінювали в межах від 0,6 до 1,6 Торр, температуру – 600...680 °C, час обробки складав 5...6 годин.

Таблиця 4.2.

Режими обробки другої партії деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування та властивості утвореного поверхневого зміцнення.

№ Режиму	Режим			Товщина зони азотованого шару, мкм		Мікротвердість ¹⁾ Н/мм ²	Нотатки
	Тиск Р, Торр	Темпера тура Т, °С	Час, год	Сіра фаза	Нітридна зона		
1	0,6 0,55	600 640	1 4	60-63	4-5	8870/ 10750/ 9670	100%-ная сплошность, 3...7 мкм диффузионная зона
2	0,6 1,5	600 640	1 4	60	3-4	10520/ 9720/ 10920	
3	0,6 0,6 1,6	600 680 680	1 3 2	36-42	4-5	10880/ 10640/ 10640	
4 ²⁾	0,6 0,6 1,6	600 680 680	1 3 2	25-30	4-6	8620/ 9720/ 9840	
Примітки: 1) Результати виміру мікротвердості в трьох точках оброблюваної поверхні; 2) Суміш газів – азоту (60%), аргону (40%).							

При дослідженні зразків другої партії встановлено, що поверхня зразків вкрита сірою фазою, товщиною до 60 мкм, а нітридна зона сформувалась на глибину 3...4 мкм.

Отже формування функціонального покриття в декілька етапів призводить до збільшення глибини нітридної зони до 6 мкм.

Зміна режимів обробки призвела до збільшення мікротвердості поверхні (в порівнянні зі зразками першої партії).

Дослідження зразків третьої партії проводили зі збільшеним часу обробки до 50 годин (табл. 4.3).

Дослідження мікроструктури зразка обробленого за режимом №1 (табл.4.2), показали, що на поверхні зразка зменшилась кількість заліза та хрому, проте в нітридній зоні концентрація цих елементів більша.

Для дослідження впливу параметрів газового середовища на хімічний склад поверхневого шару прийнято рішення зменшити концентрацію азоту (режими №2, №3, табл. 4.3).

Таблиця 4.3.

Режими обробки третьої партії деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування та властивості утвореного поверхневого зміцнення.

№ Режим у	Режим			Товщина зони азотованого шару, мкм		Мікротвердість ¹⁾ Н/мм ²	Нотатки
	Тиск Р, Торр	Температура Т, °С	Час, год	Сіра фаза	Нітридна зона		
1	0,8	450	50	18-25	6-8	12490/ 15040/ 13230	100% ²⁾ , 6...8 мкм зона дифузії
2 ³⁾	0,8	550	16	30	35	11190	35 мкм зона дифузії
3 ⁴⁾	0,8	510	40	30	30	10640	30 мкм зона дифузії
Примітки: 1) Результати виміру мікротвердості в трьох точках оброблюваної поверхні; 2) Відсоток поверхні з нітридним шаром; 3) Концентрація азоту знижена в 2 рази порівняно з режимом №15; 4) Концентрація азоту знижена в 3 рази порівняно з режимом №15.							

Зразки третьої партії, характеризуються збільшеною мікротвердістю поверхні, в порівнянні з іншими зразками.

Аналіз результатів дослідів попередньої обробки показав що відбулось збільшення нітридної зони до 8 мкм, та зменшення сірої фази до 25 мкм, при цьому утворюється суцільний шар покриття.

Аналізуючи результати експериментальних досліджень зразків оброблених методом йонно-плазменого термоциклічного азотування встановлено, що утворення сірої фази спричинено адсорбцією атомів азоту на поверхні деталі, при цьому збільшення терміну обробки призводить до збільшення глибини сформованого покриття.

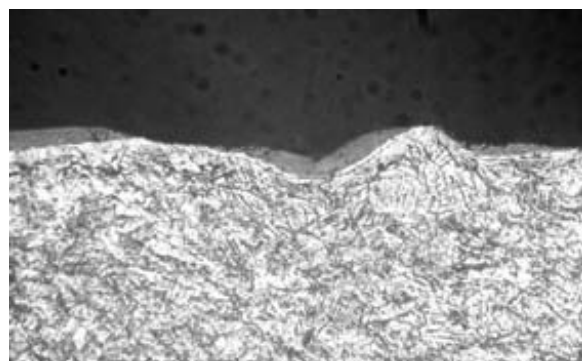
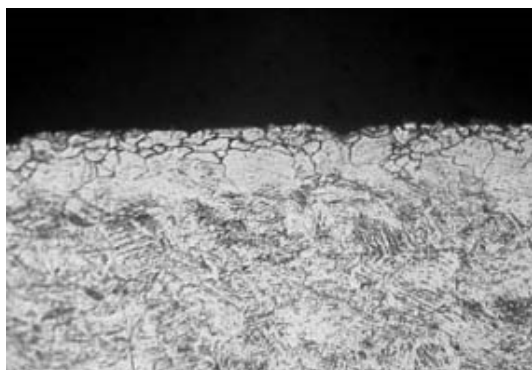
Для більш детального дослідження зразків проведено аналіз мікроструктури та твердості сформованого покриття.

4.2. Дослідження мікроструктури зразків

За результатами експериментальних досліджень, представлених в пункті 4.1, проведено мікроструктурний аналіз зразків.

Результати дослідження зразків першої партії, оброблених за режимами №1 і №5 представлено на рисунку 4.1.

Аналізуючи мікроструктуру зразків оброблених за режимами представленими в таблиці 4.1, зроблено висновки, що поверхневий шар, сформований методом йонно-плазмового термоциклічного азотування, має несутільну структуру (рис. 4.1 *а*) та неоднорідну товщину (рис. 4.1 *б*).



x400

а)

б)

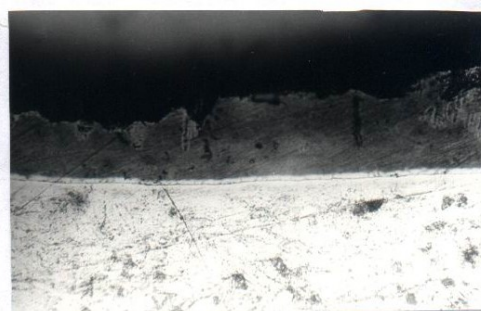
Рис.4.1 – Мікроструктура зразків першої партії оброблених за режимами (таблиця 4.1): №1 - (*а*), №5 - (*б*),

Щільність азотованого шару другої партії вище ніж у зразків першої (рис. 4.2). Сформований поверхневий шар суцільний, та рівномірно розподілений.

При дослідженні виявлено дифузійну зону глибиною 3...7 мкм, збільшення глибини дифузійної зони спричинено поступовою зміною тиску та температури в процесі обробки.



а)



б)



в)



г)

x500

Рисунок 4.2. Мікроструктура зразків другої партії (таблиця 4,2):
режим №1 (а); №2 (б); №3 (в); №4(г), відповідно.

На рисунку 4.3 показано результати аналізу мікроструктури сформованого покриття, обробленого за режимами: тиск – 0,8 Торр, температура – 450 °С, час обробки – 50 годин.



x500



x800

Рисунок 4.3 – Мікроструктура азотованого зразка, обробленого при режимах: тиск – 0,8 Торр, температура – 450 °С, час обробки – 50 год,

Аналіз мікрошліфа поверхні показав, що колір фази неоднорідний і змінюється по напрямленню від поверхні до підкладки, отже склад фази є неоднорідним.

На зразках третьої партії, оброблених за режимом №1, вивчали розподілення заліза та хрому по глибині азотованого шару, з метою посередньо оцінити розподіл азоту (рис.4.4)

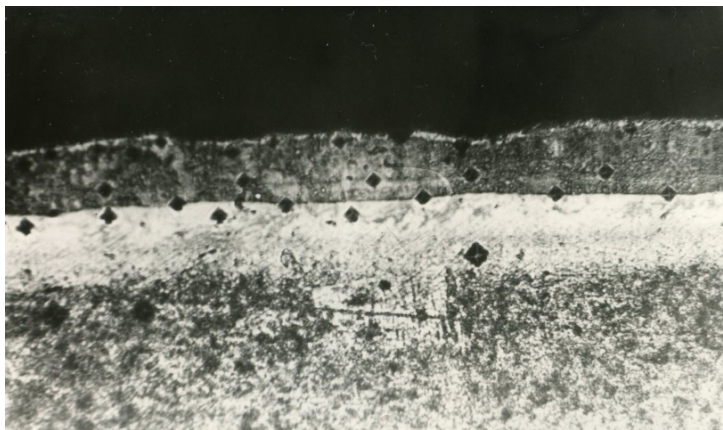


Рис. 4.4. Азотований шар зразка зі сталі 40X13 третьої партії, режим №1:
тиск – 0,8 Торр, температура – 450 °С, час обробки – 50 год,

В хімічному складі нітридного шару спостерігається збільшення кількості хрому та заліза, в порівнянні з хімічним складом сталі 40X13, проте концентрація елементів різко зменшується по напрямленню до поверхні.

Зниження концентрації елементів може бути спричинено збільшенням концентрації азоту або процесами, які призводять до видалення атомів з поверхні.

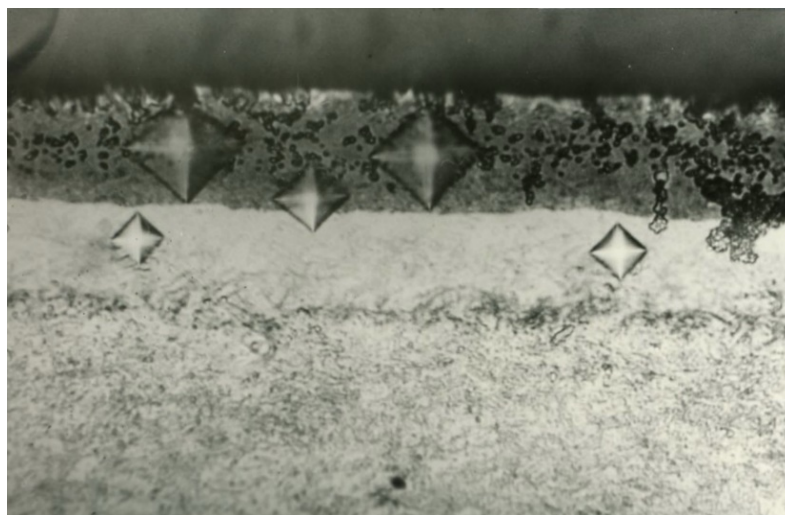
Для перевірки впливу азоту на зміну концентрації хрому та заліза в азотованому шарі виконано обробку зі зменшенням вмісту азоту (табл. 4.3, режими №2, №3).

Виявлено, що при обробці за режимами №2 і №3 (табл.4.3) товщина сірої фази та дифузійної зони збільшилась, що спричинене підвищенням температури обробки. Також виявлено, що границя нітридної зони на відміну від попередніх зразків збільшилась до 10 мкм.

4.3 Дослідження мікротвердості сформованого покриття

Поверхнєве зміцнення деталей застосовують для підвищення механічних властивостей деталей, тому проведено аналіз мікротвердості функціонального покриття, сформованого методом йонно-плазмового термоциклічного азотування.

На рисунку 4.5 представлено мікроструктуру поверхні, обробленої зі зменшенням концентрації азоту в два рази, порівняно з попередніми параметрами.



x500

Рис. 4.5 – Мікроструктура зразка обробленого при зниженні концентрації азоту в 2 рази: режим азотування №2 (таблиця 4,3.).

Якість поверхні зразка, обробленого зі зменшенням концентрації азоту співпадає з попереднім зразком.

Проаналізувавши мікроструктуру поверхонь зразків трьох партій, зроблено висновок, що на формування поверхневого шару впливає технологічні фактори.

Змінюючи режими обробки встановлено, що зразки оброблені за третім режимом мають найкращу мікроструктуру в порівнянні з іншими, поверхневий шар характеризується 100% суцільністю та збільшенням дифузійної зони до 35 мкм.

В результаті проведених експериментальних досліджень побудовано графік розподілення мікротвердості по глибині азотованого шару.

На рисунку 4.6 показано розподіл мікротвердості поверхні зразків оброблених постійному режимі: тиск – 0,7 Торр, температура – 600 °С, час обробки протягом 3 години (Рис. 4.6. п.1)

Режим 2 проводили при тиску, який змінювався від 0,6 до 0,55 Торр, а при цьому температура змінювалась від 600 до 640°C, час обробки протягом 5 годин(Рис. 4.6. п.2).

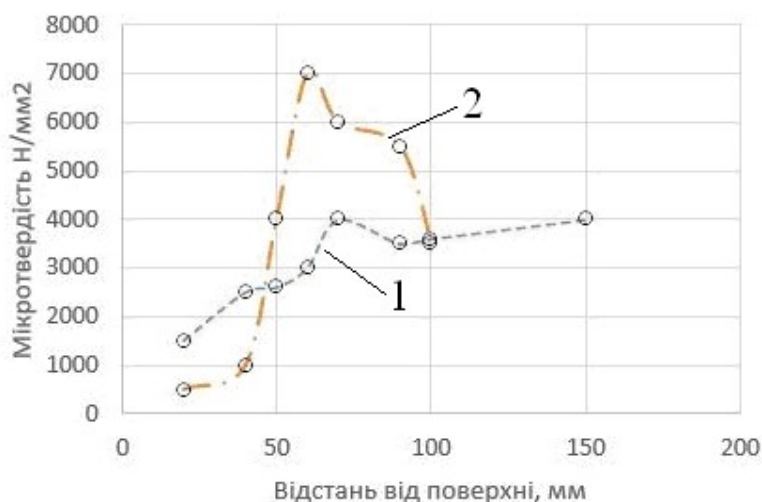


Рисунок 4.6. Розподіл мікротвердості по глибині азотованого сталі 40X13:

$P - 0,7$ Торр, $t - 600$ °C, $\tau - 3$ години (1);

$P - 0,6 \dots 0,55$ Торр, $t - 600 \dots 640$ °C, $\tau - 5$ години (2)

Дослідження мікротвердості по глибині шару показали, що мікротвердість збільшується по напрямленню від поверхні шару до сірої фази та підкладки.

Таке розподілення мікротвердості спричинено дифузійними процесами, які виникають в процесі обробки.

Порівнюючи показники мікротвердості першого зразка та другого видно, що мікротвердість поверхні зразка під номером два більша за перший.

Підвищення мікротвердості спричинено підвищенням температури та терміну обробки.

На рисунку 4.7. показано графік розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару зразка, обробленого за режимами: тиск – 0,8 Торр, температура – 450 °C, час обробки – 50 годин (рис.4.7).

Мікротвердість вимірювали при навантаженні 100 г.

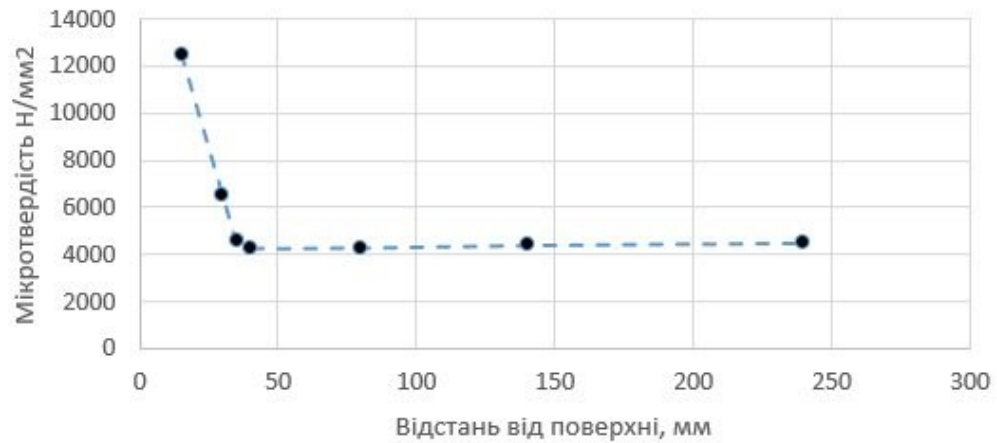


Рис. 4.7 – Розподіл мікротвердості по глибині азотованого зразка сталі 40X13: $P - 0,8$ Торр, $t - 450$ °C, $\tau - 50$ годин

Мікротвердість зразка значно вища, ніж в зразках, оброблених при інших режимах.

Проте застосування даного режиму вважається нераціональним, через збільшення тривалості обробки в декілька разів.

Аналізуючи режими та мікроструктуру поверхні встановлено, що при обробці за режимами першої партії функціональні покриття утворюються на глибині 2...3 мкм, що характеризується відсутністю дифузійного проникнення.

Друга партія характеризується наявністю дифузійної зони, поверхневий шар має більшу твердість в порівнянні з дослідом першої партії.

Застосовуючи режими обробки, наведені для третьої партії, встановлено що при цьому утворюється шар підвищеної твердості товщиною до 60 мкм.

Виходячи з того, що для отримання параметрів мікроструктури третьої партії тривалість обробки збільшується в десятки разів в порівнянні з іншими рекомендується проводити обробку йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням сталі 40X13 за режимами другої партії.

4.4 Моделювання впливу технологічних параметрів на поверхневе зміцнення деталей.

Для дослідження впливу параметрів обробки методом йонно-плазмового термоциклічного азотування (робочий тиск, температура, тривалість обробки) на кінцевий результат обробки (товщину поверхневого зміцнення), використано метод математичного моделювання – метод групового врахування аргументів.

Факторами варіювання вибрано: робочий тиск (Мікроторр), температура обробки ($^{\circ}\text{C}$), тривалість обробки (год).

В якості параметра оптимізації вибрано товщину нітридної зони (мкм).

На основі результатів експерименту сформовано вхідні дані для експериментальних розрахунків.

Вхідні дані записуються в текстовий файл (рис. 4.8), в якому в першому стовпці вказано параметри робочого тиску, другому – температура, третьому – тривалість обробки, четвертий – товщина нітридного шару, рядок відповідає номеру експерименту.

Вхідні дані – Блокнот

Файл	Правка	Формат
60	580	3 5
90	540	3 3
60	620	3 4
90	600	3 3
65	580	3 4
80	560	3 1
70	640	3 4
80	450	50 8
80	550	16 35
80	510	40 30

Рис. 4.8. Вхідні дані програми МГВА

В результаті обробки статистичної інформації отримуємо оптимальну модель процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування, яка записується у файл (рис. 4.9).

*Оптимальна модель – Блокнот

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
------	--------	--------	-----	---------

Моделювання впливу технологічних параметрів на формування нітридного шару
Виконала студентка групи ПБ-81мп
Прихожа Д.В.
Оптимальна модель буде мати вигляд

$$y = 164.95919 + -1.63522x_1 + -0.13261x_2 + -34.85650x_3 + 0.00090x_1x_2 + 0.35484x_1x_3 + 0.01433x_2x_3$$

Рис. 4.9. Приклад результату виконання програми МГВА

В результаті виконання програми отримали залежність товщини нітридної зони утвореної методом йонно-плазмового термоциклічного азотування від трьох параметрів обробки, а саме: тиску, температури та тривалості обробки.

$$y=164.96-1.635x_1+0.1326x_2-34.8565x_3+0.0009x_1x_2+0.3548x_1x_3+0.014x_2x_3, \quad (4.1)$$

де: y – товщина нітридного шару,

x_1 -робочий тиск (Мікроторр);

x_2 -температура обробки ($^{\circ}\text{C}$);

x_3 -тривалість обробки (год).

Аналізуючи отриману модель, можна зробити висновки, що найбільший вплив на товщину нітридної зони має тривалість обробки.

За допомогою розробленої програми сформовано математичну модель впливу технологічних параметрів обробки на формування азотованого шару (4.2).

$$y=-133.86+0.04x_1+0.35x_2-12.94x_3, \quad (4.2)$$

де: y – товщина азотованого шару,

x_1 -робочий тиск (Мікроторр);

x_2 -температура обробки ($^{\circ}\text{C}$);

x_3 -тривалість обробки (год).

На основі моделі (4.2) отримано графік (рис.4.10). залежності товщини поверхневого зміцнення, утвореного методом йонно-плазмового термоциклічного азотування від температури та тиску, термін обробки – незмінний – 3 години.

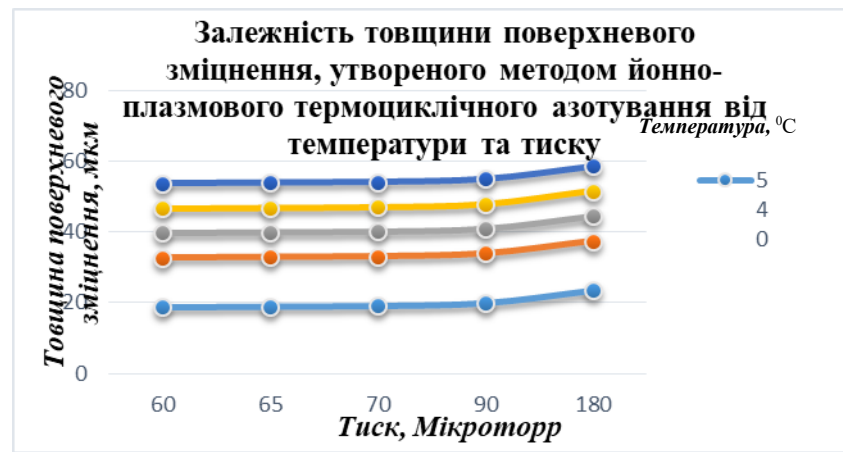


Рис. 4.10. Залежність товщини азотованого шару від t температури та тиску P .

Проаналізувавши отриману залежність зроблено висновки, що зі збільшенням температури обробки збільшується товщина поверхневого зміцнення деталей (рис.4.10).

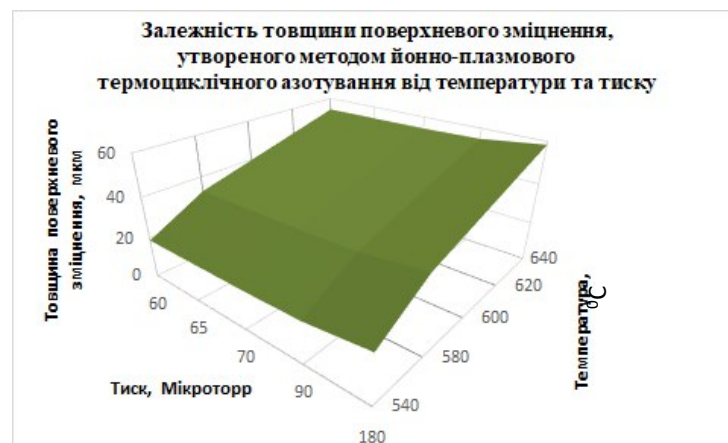


Рис. 4.10. Залежність товщини азотованого шару від температури (t) та тиску (P).

За результатами програмного забезпечення отримано залежності формування нітридної зони та азотованого шару від параметрів обробки методом йонно-плазмового термоциклічного азотування

Моделі, які сформовані методом групового врахування аргументів описують вплив температури, тривалості обробки та тиску на товщину нітридної зони та азотованого шару утвореного методом йонно-плазмового термоциклічного азотування, при цьому найбільший вплив має тривалість процесу та температура обробки.

Висновки.

1. Отримано математичну модель впливу технологічних параметрів на формування нітридної зони. Встановлено, що найбільший вплив на товщину нітридної зони має тривалість обробки.
2. Отримано математичну модель впливу технологічних параметрів на формування азотованого шару та залежність впливу тиску та температури на товщину азотованого шару. Встановлено, що при сталій тривалості обробки найбільший вплив на товщину поверхневого зміцнення має температура обробки.
3. Експериментальні дослідження мікротвердості сталі 40X13, обробленої йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням, показали, що мікротвердість збільшується по напрямленню від поверхні шару до сірої фази та підкладки.
4. В результаті обробки методом йонно-плазмового термоциклічного азотування утворюється поверхневий шар з двох зон (нітридної, та сірої фази). Утворення сірої фази спричинено адсорбцією атомів азоту на поверхні деталі, тобто насичення деталей атомами азоту завжди супроводжується утворенням сірої фази.

РОЗДІЛ. 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ»

5.1 Опис ідеї проекту

Проведено аналіз методів зміцнення поверхневих шарів деталей приладів, виявлено що реалізація процесу зміцнення це довготривалий процес, який потребує спеціального устаткування. Розглянувши всі методи було обрано метод йонно-плазмового термоциклічного азотування та спроектовано систему автоматизованого контролю параметрів технологічного процесу. Перевагою даного методу є отримання функціонального покриття з підвищеними механічними властивостям. Застосування автоматизованого контролю призводить до скорочення робочого персоналу та зниження собівартості продукції. Проведено ряд експериментів, виконаних методом йонно-плазменого термоциклічного азотування і виявлено, що за допомогою подачі пульсуючої напруги скорочується термін обробки, також відбувається підвищення зносостійкості, твердості, корозійної стійкості поверхні деталей, що розширює область використання даного продукту. На основі експериментів розроблено рекомендації щодо використання режимів обробки, за допомогою яких можна визначити структуру сформованого функціонального покриття, це призводить до підвищення точності обробки.

Для реалізації даного продукту на ринку потрібно провести аналіз можливості виходу продукту на ринок, а також його конкурентоспроможність в порівнянні з аналогами, які вже посіли у ньому на певному місці[44].

Зміст запропонованої ідеї, базові потенційні ринки, в межах яких необхідно шукати групи потенційних клієнтів наведено у таблиці 5.1[44].

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
За допомогою розробленої автоматизованої системи обробки деталей приладів методом йонно-плазмового термоциклічного азотування формується функціональне покриття, яке підвищує зносостійкість, твердість, корозійну стійкість виробів. Для реалізації методу скорочується термін виробництва, знижується собівартість продукції, підвищується точність обробки.	Приладобудування	Можливість застосування виробів при циклічних навантаженнях, Підвищення довговічності роботи, скорочення терміну виготовлення покриття.
	Машинобудування	Отримання функціонального покриття з високою точністю та підвищеними механічними властивостями.
	Авіабудування	Застосування продукту в агресивних умовах та при циклічних навантаженнях.
	Ракетобудування	Можливість створення продукту складної конфігурації, без зміни властивостей поверхні.

Отже, запропонований продукт, виготовлений, методом йонно-плазмового термоциклічного азотування підвищує функціональні можливості виробів, а саме зносостійкість, корозійну стійкість, твердість, що призводить до можливості використання продукту в агресивних умовах та при циклічних навантаженнях. Тому проект є актуальним і завдяки універсальності застосування та великій кількості переваг знайде своє коло користувачів на ринку [44].

Проведемо аналіз потенційних переваг ідеї техніко-економічного плану у порівнянні з пропозиціями конкурентів[44]:

- визначити перелік техніко-економічних характеристик ідеї;
- визначити попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо

збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2) [44].

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характерист ики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторон а)	N (ней- тральн а сторон а)	S (сильн а сторо на)
		Мій проект	АВІК ПРОМ	ДАХК «Артем»	КЦКБ А			
1.	Торгівельна марка	немає	є	Є	є	+		
2.	Точність обробки	Висо ка	Серед ня	Низьк а	Серед ня			+
3.	Твердість поверхні	Висо ка	Висок а	Серед ня	Серед ня			+
4.	Терміни виготовлення	15 год	24 год	48 год	30 год			+
5.	Зносостійкіс ть	Висо ка	Серед ня	Низьк а	Низьк а			+
6.	Корозійна стійкість	Висо ка	Серед ня	Серед ня	Серед ня			+
7.	Патенти на продукти	є	є	є	є		+	
8.	Ринкова ціна	Сере дня ціна	Висок а ціна	Висок а ціна	Висок а ціна			+

Проведено порівняння техніко-економічних характеристик даного проекту з потенційними конкурентами. В результаті аналізу визначено, що сильними сторонами ідеї є точність обробки, твердість поверхні, зносостійкість, корозійна стійкість, терміни виготовлення та ринкова ціна. Кінцевий продукт, виготовлений методом йонно-плазмового термоциклічного азотування в

порівнянні з продуктами конкурентів володіє перевагами в термінах виготовлення, зносостійкості, корозійної стійкості, а також у вартості [44].

5.2. Технічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (методики розрахунків), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту [44].

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3[44].

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Розробити систему контролю температури	Придбати пірометр та вторинний перетворювач	Наявна	Доступна
2	Розробити систему контролю робочого тиску	Придбати датчик Пірані, вакуумметр, редуктор, вакуумний насос	Наявна	Доступна
3	Розробити систему забезпечення газом	Придбати датчик витрат газу, регулятор витрат газу.	Наявна	Доступна
4	Проводити очистку поверхонь методом катодного розпилення	Реалізація процесу в тліючому розряді	Наявна	Доступна
5	Нагрів деталі відбувається подачею пульсуючої напруги	Подача на анод та катод пульсуючого струму	Наявна	Доступна

Проведено аналіз ідей проекту, визначено, що для реалізації проекту потрібні технології та прилади, які наявні на ринку. Отже відпадає потреба у формуванні

нових технологій та проектуванні приладів контролю, що призводить до скорочення часу на проектування та виходу проекту на ринок.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації[44].

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів[44].

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку (табл. 5.4) [44].

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту[44]

<i>№ n/ n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція вітчизняних та зарубіжних фірм
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	63,2%

Провівши аналіз потенційного ринку стартап-проекту, виявлено, що не зважаючи на наявність на ринку конкурентоспроможних фірм, динаміка ринку зростає, специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації відсутні, середня норма рентабельності складає 63,2 %. Наведені фактори позитивно впливають на умови виходу нашого продукту на ринок [44].

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5) [44].

Таблиця 5.1. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Підвищення механічних властивостей деталей	Приладобудівні, авіа- та ракетобудівні підприємства	Тип виробництва	Висока зносостійкість, корозійна стійкість, твердість

Проаналізувавши потребу, яка формує ринок, визначено, що цільовими сегментами ринку є приладобудівні, авіа- та ракетобудівні підприємства, які потребують підвищення механічних властивостей деталей для збільшення ресурсу їх роботи. Орієнтовними вимогами аудиторії до товару є підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, твердості деталей, що надає можливість використовувати даний товар в агресивних умовах та при циклічних навантаженнях. А також формування функціонального покриття на поверхні складної конфігурації, без короблення форми деталі [44].

При впровадженні даного проекту існують загрози, які потрібно врахувати, проаналізувати та визначити можливу реакцію компанію на виникнення того чи іншого фактору. Фактори загроз наведено в таблиці 5.6 [44].

Таблиця 5.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Конкуренція	Необхідність у збільшенні ресурсу роботи деталей спричиняє появу нових технологій.	Підвищення якості та точності нанесення покриття.

Продовження таблиці 5.6.

2	Кадри	Виникає необхідні у висококваліфікованих кадрах, для реалізації даного методу	Проведення атестації та навчання кадрів, для підвищення рівня їх знань
---	-------	---	--

3	Відсутність попиту на продукції	Через те, що технологія нова, покупці не поспішають купувати товар.	Розповсюдження реклами з наведенням аргументів та переваг даного продукту. Представлення зразків поверхневого покриття та результатів аналізу механічних властивостей продукту.
4	Старіння	Високі темпи розвитку технологій	Проведення аналізу ринку та нових технологій, вдосконалення запропонованого покриття
5	Інфляція	Зміна курсу гривні, що спричинить зміну ціни товару	Моніторинг економічної ситуації в країні

Аналізуючи ринкове середовище зроблено висновок, що найбільшою загрозою для реалізації проекту є наявність конкурентно спроможних фірм на ринку, що зумовлено поширенням тенденції на збільшення ресурсу роботи виробів [44]. Для уникнення даної загрози компанія повинна акцентувати увагу на підвищення механічних властивостей деталей, а саме, якості та точності нанесення покриття, що призведе до підвищення ресурсу роботи в агресивних середовищах та при циклічних навантаженнях.

В таблиці 5.7 визначено існуючі фактори можливостей. Проаналізовано можливості, які сприяють виходу товару на ринок та переваги, які отримає компанія згідно реакції на той чи інший фактор [44].

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Попит на якісний продукт	Можливість формувати покриття високої якості на деталях складної конфігурації.	Дослідження нових технологій, вдосконалення методу
2	Створення нової роздрібною мережі в Україні	Розширення можливості збуту продукту	Акцентувати увагу на зносостійкості, корозійній стійкості та твердості покриття, а також терміни виготовлення.
3	Економічні	Підтримка інноваційного виробництва	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
4	Науково-технічні	Модернізація технології виготовлення продукту	Впровадження нової технології, підвищення функціональних можливостей товару та ціни.
5	Можливість стати монополістом	Акцентуючи увагу на перевагах та постійно вдосконалювати технологію, можна стати монополістом.	Робота над вдосконаленням поверхневого покриття, створення нових функціональних можливостей товару.

Наступним етапом після оцінки факторів можливості виступає ступеневий аналіз конкуренції на ринку для визначення основних особливостей конкурентного середовища та в чому вони проявляються (табл. 5.8) [44].

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Олігополія	Конкуренція декількох домінуючих в галузі фірм	Виготовлення товару, високої якості та точності
2. Національний	Конкуренція фірм на міжнародному рівні	Розповсюдження реклами участь на промислових виставках
3. Внутрішньогалузева	Виробники здійснюють виготовлення продуктів, які задовольняють одну потребу	Виготовлення товару з перевагою в багатьох характеристиках.
4. Товарно-видова	Конкуренція між товарами спільного виду та призначення	Вдосконалення товару
5. Цінова	Застосування ціни як засобу забезпечення кращих умов збуту	Зменшення кількості робочих кадрів за рахунок автоматизації виробництва, що призведе до зниження собівартості продукту.
6. Марочна	Вказує на відповідальне за готовий продукт підприємство	Створення власної торгівельної марки

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що для успішної реалізації продукту потрібно відслідковувати потреби клієнтів та задовольняти їх шляхом модернізації виробництва та товару. Запропонований проект має безліч переваг у конкурентів та має всі шанси виходу на ринок. Через наявність особливих якостей, таких як зносостійкість, корозійна стійкість, товар не має товарів-замінників [44]. Аналізуючи конкуренцію на ринку визначено, що тип конкуренції – олігополістична конкуренція.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.9) [44].

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	<i>АВИК ПРОМ ДАХК «Артем» КЦКБА</i>	Наявність торгівельної марки, наявність постійних споживачів товару.	Значні розміри поставок, диференціація витрат	Розміри закупівель, торгівельні знаки	Загрози сторони товарів заміників не існує
Висновки:	Високий рівень конкуренції серед виробників продукції, збільшення прибутку через попит.	Наявність можливості входу на ринок користуючись технічними перевагами своєї продукції та швидкістю реалізації товару.	Умови роботи на ринку не диктуються постачальниками	Наявність вимог щодо якості, точності та термінів поставки продукту	Обмежень для роботи на існуючому ринку немає

Зробивши детальний аналіз умов конкуренції в галузі, визначено ринок збуту даного продукту, прямі конкуренти, та їх сильні сторони, функції постачальників та клієнтів, а також наявність товарів заміників на ринку.

Після проведення аналізу визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. На момент, поки проект не впроваджено в життя, точність аналізу невелика, проводиться лише попередня оцінка факторів конкурентоспроможності (табл. 5.10) [44].

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість	Підвищення механічних властивостей товару, що призводить до збільшення ресурсу роботи
2	Точність	Підвищення точності нанесення покриття за рахунок попереднього аналізу процесу
3	Підтримка клієнтів	Консультація щодо умов експлуатації товару, термінів виготовлення, поставки.
4	Ціновий	Зниження собівартості товару, за рахунок автоматизації виробництва.
5	Термін виготовлення	Прискорення обробки за рахунок введення імпульсного нагріву

Визначивши та обґрунтувавши фактори конкурентоспроможності (табл. 5.10) зроблено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін формування функціонального покриття утвореного методом йонно-плазмового термоциклічного азотування. Аналізуючи наведені чинник, що роблять фактори в порівнянні з конкурентними проектами значущими, визначено, що основними перевагами продукту є якість, точність поверхневого зміцнення та термін виготовлення продукції (табл. 5.11).

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін
«Формування функціонального покриття утвореного методом
йонно-плазмового термоциклічного азотування»

№ n/ n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з КСК						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість	19						+	
2	Точність	19						+	
3	Технічна підтримка	15					+		
4	Ціна	16						+	
5	Термін виготовлення	18							+

Складання SWOT-аналіз є фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту. Розроблено матриці аналізу сильних та слабких сторін,

можливостей та загроз на основі виділених ринкових можливостей та загроз, сильних і слабких сторін (табл. 5.12) [44].

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<i>Сильні сторони:</i> підвищення якості поверхневого зміцнення; висока точність обробки; швидкість виготовлення; доступна цінова категорія; підтримка клієнтів; новизна технології; обробка виробів складної конфігурації; підвищення механічних властивостей.	<i>Слабкі сторони:</i> наявність фірм конкурентів; продукт ще не зарекомендував себе на ринку; немає торгової марки.
<i>Можливості:</i> попит на якісний та точний продукт; наявність можливості створення роздрібною мережі в Україні; можливість стати монополістом; модернізація технологій; підтримка інновації.	<i>Загрози:</i> конкуренція; наявність технологій, які перевірені часом; старіння продукції з часом; відсутність кадрів з обслуговування.

Провівши SWOT-аналіз наведено сильні та слабкі сторони, а також можливості та загрози виходу проекту на ринок (табл. 5.12). В результаті аналізу виявлено, що проект формування поверхневого зміцнення деталей має достатньо переваг та можливостей для виходу на ринок. Всі перелічені переваги продукту дозволяють конкурувати з фірмами, які вже існують на ринку [44].

За результатами SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап проекту на ринок та найбільш оптимальний час їх реалізації з огляду на наявність потенційних проектів конкурентів, що можуть бути виведені на ринок [44].

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13) [44].

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Розробка нової технології поверхневого зміцнення деталей	низька	12 міс.
2	Модернізація методу поверхневого зміцнення йонно-плазмового термоциклічного азотування	висока	4 міс.

Отже, з зазначених альтернатив обрано модернізацію методу йонно-плазмового термоциклічного азотування, оскільки ймовірність отримання ресурсів – висока, а строки реалізації проекту в 3 рази коротші за розробку нової технології поверхневого зміцнення. Також недоліком створення нової технології є потреба у висококваліфікованих робітниках та високоточному обладнанні.

5.4.Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14) [44].

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Державні підприємства	Готові	Середній попит	Висока	Складна
2	Приватні підприємства	Готові	Високий попит	Середня	Середня

3	Науково-дослідний інститут	Готові	Низький попит	Низька	Просто
---	----------------------------	--------	---------------	--------	--------

Приватні та державні підприємства обрано у якості цільових груп. Аналізуючи готовність споживачів прийняти продукт, орієнтовний попит в межах цільової групи, інтенсивність конкуренції в сегменті, простота входу у сегмент зроблено висновки що при виборі у якості потенційних клієнтів державні та приватні підприємства існує високий та середній рівень конкуренції, а також складний вхід, проте попит на продукцію більший ніж у науково-дослідницькому інституті, що спричинить швидшу реалізацію прибутку та збільшення продукції.

Проведено аналіз потенційних груп споживачів. За результатами аналізу обрано цільові групи потенційних клієнтів, для яких буде запропоновано формування поверхневого покриття для підвищення корозійної стійкості, зносостійкості та твердості матеріалу, а також визначено стратегію за допомогою якої виконуватиметься захоплення ринку. Враховуючи специфіку виробництва обрано стратегію диференціації. Аналізуючи те, що у даного продукту достатньо переваг над конкурентами зроблено висновки, що дана стратегія більше за всі інші підходить для нашого продукту [44].

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.15) [44].

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/ n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1	Стратегія спеціалізації	Стратегія одnosegmentної концентрації	Висока точність обробки, висока якість обробки поверхні, терміни виготовлення	Стратегія диференціації

Отже, в результаті аналізу визначення базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації. Метою стратегії є надання товару властивосте, які важливі для споживача та роблять товар унікальним серед товарів конкурентів. Дана стратегія потребує високих витрат, проте збільшує рентабельність продукції. Для успішної реалізації стратегії потрібно постійно вдосконалювати продукт та аналізувати потребу потенційних клієнтів [44]. Альтернативою розвитку проекту обрано стратегію спеціалізації. Стратегія передбачає зосередження на одному цільовому сегменті та задоволення його потреб [44]. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16 [44]. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Проект не є «першопрохідцем»	Створена компанія забиратиме клієнтів у конкуруючих фірм.	Скопійованими характеристиками буде твердість поверхні	Стратегія заняття конкурентної ніші

Орієнтація компанії направлена на вдосконалення продукту та реалізацію унікального продукту серед конкурентів, тому в якості стратегії конкурентної поведінки обрано стратегію зайняття конкурентної ніші. Обрана ніша відповідає цілям компанії та специфіки виробництва, а також є прибутковою протягом тривалого часу та неприваблива для конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу

асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект (табл. 5.17) [44].

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/ п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
11	Висока якість та точність обробки, низька ціна, терміни виготовлен ня	Стратегія диференц іації	Вища точність, надання своєчасної технічної підтримки.	Якість Точність Швидкість

Основними сегментами ринку обрано державні та приватні підприємства. Незважаючи на складність входу у сегмент, у даних груп наявний високий попит на продукт, що пришвидшить реалізацію товару на ринку. Через орієнтованість на надання властивостей товару, які відмінні ніж у конкурентів, за базову стратегію обрано стратегію диференціації. В разі невдалої реалізації стратегії альтернативною вибрано стратегію спеціалізації. Реалізація даної стратегії буде зосереджена на одному сегменті. В якості стратегії конкурентної поведінки обрано стратегію зайняття конкурентної ніші. Для реалізації товару визначено стратегію позиціонування, вибрано три асоціації, а саме: якість, точність, швидкість. Наведені асоціації співпадають з вимогами цільової аудиторії до товару.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару[44].

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції
потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Висока якість	Висока якість	Підвищення якості поверхневого покриття
2	Висока точність	Вища точність	Підвищена точність обробки
3	Терміни виконання	Швидкість реалізації	Швидкість розробки товару.

Визначивши ключові переваги концепції потенційного товару перед конкурентами, визначено, що поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування задовольняє всі потреби споживачів, та має ключові переваги перед конкурентами. В якості ключових переваг є: підвищена якість поверхневого покриття, висока точність обробки та швидке виготовлення товару в порівнянні з конкурентами.

Розробляється трирівнева маркетингова модель товару у якій описується ідея продукту та/або послуги, особливості процесу його створення, його фізичні складові (табл. 5.19) [44].

У таблиці 5.19 було створено та описано трирівневу модель функціонального покриття, сформованого методом йонно-плазмового термоциклічного азотування, з високими механічними властивостями. Сформовано опис товару за задумом, визначено властивості товару, спосіб його пакування продукту, марку та засоби захисту від копіювання і плагіату [44].

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Функціональне покриття, сформоване методом йонно-плазмового термоциклічного азотування, з високими механічними властивостями		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Якість	Нм	Тл
	2. Точність	Нм	Тл
	3. Технічна підтримка	М	Тх
	4. Термін реалізації	Нм	Тл
	5. Ціна	Нм	Е
	6. Транспортабельність	М	Тх
	Якість: Відповідає нормам ДСТУ ISO 4507:2018 «Матеріали на основі заліза спечені, цементовані або ціановані. Визначення та підтвердження глибини поверхневого зміцнення випробуванням на мікротвердість»		
Пакування: Дерев'яна коробка з зображенням торгівельної марки та назвою продукту, в середині коробки експериментальні висновки та характеристики сформованого покриття.			
Марка: назва організації-розробника + «Функціональне покриття методом йонно-плазмового термоциклічного азотування»			
III. Товар із підкріплення М	Розповсюдження реклами		
	Знижка за умови оптової закупівлі		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист інтелектуальної власності, патент на винахід.			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.20) [44].

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	-	18000	Високий	16000 - 17000 грн

Враховуючи відсутність товарів-замінників запропонованого продукту, та проаналізувавши рівень цін на товари-аналоги, рівень доходів цільових груп а також витрати на закупівлю необхідного обладнання та оплати робочої сили, визначено що для успішної реалізації товару та отримання прибутку ціна на товар повинна знаходитись в межах від 16000 до 17000 гривень

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21) [44]:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Звичайна купівля з певними змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання в деякій мірі модифікованих товарів з наданням додаткових властивостей, або різницю в ціні на товар, або ж зміну об'єму постачання.	Основні функції постачальника: виготовлення продукту, модернізація технології, зберігання продукту, пакування, функції посередника: продаж товару, контакт з покупцем, популяризація пропонованого продукту.	Канал першого рівня	Оптимальна система збуту через посередника. Виробник виготовляє товар, модернізує та покращує по необхідності, а посередник здійснює продаж товару клієнту і застосовує три способи прямого продажу : Торгівля в роздріб Посилкова торгівля Магазинна торгівля

Через те, що для реалізації даного товару потрібні транспортні засоби, та є високий попит на дану продукцію, збут продукції вирішено проводити через посередника. Реалізація через посередника дає можливість сконцентруватися на вдосконаленні властивостей товару, збільшити кількість виробництва товару, виготовляти товар високої якості. Що в умовах вибраної спеціалізації позитивно вплине на реалізацію продукції.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування (табл. 5.22) [44].

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Наявність якісного товару зі специфічними властивостями та доступною цінковою політикою.	Інтернет ресурси, виробничі виставки, каталоги, наукові статті, презентації виробників	Доступність та змістовність інформації щодо фірми та товару. Раціональне прийняття рішень.	Розповсюджен ня інформації про товар та його властивості, формування знань про товарну марку	Формування поверхневого покриття з високими механічними властивостям и за короткі терміни

Розроблено маркетингову стратегію стартап проекту. Визначено переваги поверхневого зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування в порівнянні з фірмами – конкурентами. Аналіз переваг показав, що даний товар має достатню кількість ексклюзивних властивостей, які сприяють швидкому та вдалому виходу товару на ринок. Описано трирівнева модель товару, де проведено огляд характеристик товару, пакування, транспортування, торгівельної марки та правового захисту виробу. Проаналізовано ціни на товари-аналоги та собівартість продукту визначено ціну для реалізації товару (16000-17000 грн.). Проаналізовано попит на продукцію та розміри товару, та визначено, що збут здійснюватиметься через посередника. Посередник

займатиметься, рекламою, реалізацією, доставкою товару, що дозволить сконцентрувати увагу на виробництві товару, підвищенні якості та точності обробки, а також модернізації виробництва. Спираючись на обрану основу позиціонування товару розроблено концепцію маркетингових комунікацій, за допомогою якої визначено канали комунікації цільових клієнтів, на основі цього обрано канали розповсюдження реклами. Основними каналами обрано: інтернет ресурси, виробничі виставки, каталоги, наукові статті, презентації виробників.

Висновки

Актуальною задачею сьогодення являється створення захисних покриттів для підвищення ресурсу їх роботи. Отже стартап проект «Підвищення зносостійкості поверхонь методом йонно-плазмового термоциклічного азотування» є актуальним.

Проаналізувавши стартап проект «Підвищення зносостійкості поверхонь методом йонно-плазмового термоциклічного азотування», виявлено що продукт користується попитом на ринку та має безліч переваг над конкурентами, таких як: точність обробки, зносостійкість, корозійна стійкість, обробка поверхні складної форми, твердість обробки, терміни виготовлення продукції.

В ході аналізу здійснено порівняння продукту з аналогами, визначено сильні, слабкі та нейтральні сторони розробленого проекту. Сильними сторонами виявились точність обробки, твердість обробки, терміни виготовлення, корозійна стійкість та зносостійкість. Запропонований проект має переваги в сильних сторонах продукту серед існуючих конкурентів, отже ідея є конкурентоспроможною та має можливість виходу на ринок.

Визначено технології та обладнання для реалізації проекту. Проаналізувавши необхідні компоненти для втілення проекту зроблено висновки, що для створення та виготовлення готової продукції всі технології та прилади є наявності, що призводить до скорочення термінів виготовлення та пришвидшенню виходу товару на ринок. Проаналізувавши ринок збуту

визначено напрямки застосування даного продукту. Найбільші вигоди товар має для приладо-, авіа-, та ракетобудівних підприємств.

Аналізуючи фактори загроз та можливостей встановлено, що наявні бар'єри для виходу на ринок, проте переваг більше, тому продукт доцільно реалізовувати.

В якості стратегії маркетингу обрано стратегію диференціації. Для успішної реалізації стратегії потрібно звертати увагу на модернізацію виробництва та задоволення потреб споживача. Через те, що даний товар є вузько-спеціалізований за базовою стратегією конкурентної поведінки обрано – заняття конкурентної ніші. Реалізацію товару вирішено проводити через посередника, який буде виконувати такі функції: продаж товару, контакт з покупцем, популяризація пропонованого продукту.

Розроблено маркетингову концепцію, проаналізовано специфіку поведінки цільових клієнтів, канали комунікацій, визначено завдання рекламного повідомлення та концепцію рекламного звернення.

Реалізація стартап проекту «Підвищення зносостійкості поверхонь методом йонно-плазмового термоциклічного азотування» є прибутковою через високий попит на даний товар та низьку якість та точність обробки у конкурентів. Зробивши акцент на перевагах даного товару та провівши рекламну компанію, маємо всі шанси завоювати ринок та стати лідером.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз вітчизняних та зарубіжних літературних джерел про існуючі методи поверхневого зміцнення деталей приладів і механізмів.
2. Розроблено теоретичну залежність впливу режимів йонно-плазмового азотування на глибину поверхневого зміцнення конструкційної сталі 40X13.
3. Отримано математичну модель впливу технологічних параметрів процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування на фізико-механічні властивості сформованого зміцненого покриття.
4. Проведено експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування на твердість та мікроструктуру сталі 40X13.
5. Експериментальні дослідження мікротвердості сталі 40X13, обробленої йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням, показали, що мікротвердість збільшується по напрямленню від поверхні шару до сірої фази та основи.
6. Встановлено математична залежність впливу тиску та температури на товщину азотованого шару, при сталій тривалості обробки найбільший вплив на товщину поверхневого зміцнення має температура обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Елагина, О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин [Электронный ресурс] : учеб. пособие / О.Ю. Елагина .— М. : Логос, 2009 .— 488 с. : ил. — (Новая университетская библиотека) .— ISBN 978-5-98704-450-6 .— Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/178060>
2. Антонюк В.С. Методологія наукових досліджень: [Текст] : навч. посіб./ В.С. Антонюк, Л.Г. Полонський, В.І. Аверченков, Ю.А. Малахов. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 276 с.
3. Антонюк В.С., Дигам М.С. Новое в формировании упрочняющих покрытий фрикционных поверхностей //Сучасне машинобудування. - Київ: №1.-1999.-С. 105 - 110.
4. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Кумуржі А. Ю., Антонюк В.С., Качинський Д.О., Томащук В.С. Застосування йонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Вип №3(74) – 2015 - С. 28 – 33.
5. Босяков М. Н. Технологические возможности ионного азотирования в упрочнении изделий из конструкционных и инструментальных сталей [Электронный ресурс] // М. Н. Босяков, С. В. Бондаренко, Д.В.Жук, П.А.Матусевич – Режим доступа: <https://refdb.ru/look/1904130.html>
6. Ежелев, А. В. Анализ способов обработки поверхностно пластическим деформированием [Текст] / А. В. Ежелев, И. Н. Бобровский, А. А. Лукьянов // Fundamental Research. 2012. № 6. С. 642–646.
7. Кабатов, А. А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А. А. Кабатов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. № 58. С. 49–54.

8. Antonyuk, V.S., Soroka, E.B., Lyashenko, B.A., Rutkovskii, A.V. Discontinuous coatings on cutting tools // *Strength of Materials*, 39, No 1, 99 – 102 (2007).

9. Антонюк В.С., Сорока Е.Б. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия - 2008. – № 10. - С. 8 - 13.

10. Лобачова Г. Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хіміко-термічною обробкою : дис. ... канд. техн. наук. : 05.16.01 – металознавство та термічна обробка металів / Г. Г. Лобачова. - К., 2012. - 200 л. + CD-ROM

11. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Рутковский А.В. Мірненко В.І. Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. - Луганск – 2004 - №7(77) (Частина 2). С. 206 – 210

12. Рутковский А. В. Циклическая долговечность титанового сплава BT1-0 с покрытием, полученным методом ионно-плазменного термоциклического азотирования (ИПТА) / А. В. Рутковский, А. Ю. Кумуржи, Я. В. Можеитов. – Полтава : Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), 2012. – № 2 (32), Т. 1. – С. 208-213.

13. Антонюк В.С. Дослідження параметрів поверхневого шару сформованого йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням / В.С.Антонюк, Д.В. Прихожа, А.В. Рутковский // Зб праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (06–09 листопада 2019 р.) м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка» 2019 – С.44-47.

14. Прихожа Д.В. Вплив технологічних параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування функціональних покриттів поверхонь деталей / Д.В. Прихожа, В.С. Антонюк, А.В. Рутковский // XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених

«Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (10-11 грудня 2019 р.), К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. –2019. – С. 153– 156.

15. Покриття у приладобудуванні: / В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко [та ін.] // К. : НТТУ «КПІ», 2016. – 360 с.

16. Лойко В.А., Ивашко В.С., Клименко С.А., Антонюк В.С., Хейфец М.Л. Вакуумные ионно-плазменные технологии в ремонтном производстве: монографія / В.А.Лайко [и др. Минск: БГАТУ, 2007. – 192 с

17. Пастух И.М, Каплун В.Г. Плазменно-диффузионные процессы модификации поверхности металлов: технология и оборудование.// Труды международного научно-практического симпозиума «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», Харьков, авг. 2000 г. – с. 145-154. 150.

18. Пастух И.М., Каплун В.Г., Рудык А. Е. Повышение надежности и долговечности конструкционных элементов упрочнением поверхности диффузионным ионно-плазменным методом.// Доповіді міжнародної науково-технічної конференції ”Надійність машин та прогнозування їх ресурсу”, Ів.-Франківськ, вер. 2000 р. – с. 435-444.

19. Лойко В.А., Ивашко В.С., Клименко С.А., Антонюк В.С., Хейфец М.Л. Вакуумные ионно-плазменные технологии в ремонтном производстве: монографія / В.А.Лайко [и др. Минск: БГАТУ, 2007. – 192 с. ил.ISBN 978–985-6770-84-8.

20. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. Дискретні покриття на різальному інструменті // *Пробл. Прочности.* –2007. – №1. – С 138-143.

21. Антонюк В.С.: «Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу»././ Автореферат д-р техн. наук. Київ- 2006. – 36 с.

22. Антонюк В.С., Сорока Е.Б., Калиниченко В.И. Обеспечение адгезионной прочности в системе «основа-покрытие» в условиях контактного нагружения структуры //Сверхтвердые материалы. -Киев: № 2.-2008.- С 79 – 86.

23. Антонюк В.С. Дослідження параметрів поверхневого шару сформованого йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням / В.С.Антонюк, Д.В. Прихожа, А.В. Рутковский // 36 праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (06–09 листопада 2019 р.) м. Житомир, Державний університет «Житомирська політехніка» 2019 – С.44-47.

24. Антонюк В.С., Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б. Выбор параметров покрытия дискретной структуры при упрочнении поверхности режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия - 2005. – № 3. - С. 49 - 50.

25. Нездоля М.О., Антонюк В.С., Прихожа Д.В. Комп'ютерне моделювання пружного стану різального інструменту // Збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: Стан і перспективи, 17-18 травня 2018 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018.- С.227 – 230.

26. Ляшенко Б.А. Вплив параметрів імпульсного газотермоциклічного іонного азотування на характеристики сталевих матеріалів/ Б.А. Ляшенко, А.К. Скуратовський, О.В. Радько, Ю.П. Целіщев//Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» - 2009 – С. 97-101.

27. Остафьев В. А., Антонюк В.С., Выслоух С. П. и др. Физические основы процесса резания металлов. Коллектив авторов. Под редакцией проф. В. А. Остафьева. – Киев. : Издательское объединение «Вища школа»,

28. Антонюк В.С. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. науч.-техн. сборник. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2007, Вып.73. – С. 25-31

29. Пастух І.М. Структура та конструктивні схеми машин для вакуумно-дифузійної модифікації поверхні металів.// Вісник ТУП, Хмельницький. – 2001, №1, ч.1 “Технічні науки”. – с. 168-175.

30. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки - К.: Тэхніка . 1991. - 152 с.

31. ГОСТ 5632-2014. ГОСТ 5632-2014 Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. – Москва: Изд-во стандартов, 2015. – С. 4-26.

32. Патент України № 19782 МПК C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому розряді./ Рутковский А.В., Ляшенко Б.А. Опубл. 15.12.2006, Бюл. № 12.

33. Рутковский А.В, Ляшенко Б.А., Можеитов Я.В. Термоциклический метод обработки деталей в плазме пульсирующего тлеющего разряда. / Материалы 9-й Международной научн.-техн. конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» 25-29 мая 2009, г. Ялта. –С.125-127.

34. Рутковский А.В, Ляшенко Б.А. Модификация поверхности материалов низкоэнергетическим ионным воздействием/ Междунар. симп. ОТТОМ 10-14 сентября 2001 г.ХФТИ, Харьков, Украина.-С.94-99

35. Рутковский А.В, Ляшенко Б.А. Энергосберегающая технология и оборудование термоциклического ионного азотирования деталей машин, инструмента и технологической оснастки/ Тезисы 4-ой научно-практ. конф. «Модернизация и переоснащение предприятия. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей» 14 октября 2009, г. Днепропетровск. –С.35.

36. Антонюк В.С. Система контролю іонно-плазмового термоциклічного азотування / В.С. Антонюк, Д.В. Прихожа, А.В. Рутковский, В'ячеслав Головня // 36. тез доповідей І-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”; (13–15 травня 2019 р.) – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К»

37. Патент України № 29008,С23С 4/10. Вакуумна камера для вакуумного плазмового азотування металевих деталей./ Рутковский А.В, Ляшенко Б.А., Калініченко В.І. Опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21.

38. Прихожа Д.В., Антонюк В.С., Рутковский А.В. Автоматизована система контролю вакууму в процесі іонно-плазмового термоциклічного азотування // Стан і перспективи: збірник працьХІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у

майбутнє: Приладобудування». (15–17 травня 2019 р.) – Київ.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Центр учбової літератури. – 2019.- С. 183 – 196.

39. Заявка № u 2019 05937 Україна МПК С 23 С 14/48 Рутковский А.В., Прихожа Д.В., Антонюк В.С., Спосіб контролю процесу йонно-плазмового азотування // 30.05.2019 р., Опубл. . .2019, бюл. № /2019.

40. Прихожа Д.В., Антонюк В.С., Рутковский А.В. Автоматизированная система управления температурой детали при ионно-плазменном термоциклическом азотировании // Сб. «Новые направления развития приборостроения» Материалы 12-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, (17–19 апреля 2019 года)–Минск. БНТУ, 2019.- С. 146.

41. Антонюк В.С., Прихожа Д.В., Максименко М.М., Назаркевич Ю.А., магістрант, Полонський Л.Г. Визначення параметрів фрагментованості зносостійкого покриття – Зб. Науково-технічнлі конференції молодих вчених і студентів Житомир // // Зб.Тез Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – С.– 185.

42. Вислоух С. П. Моделювання та прогнозування сил різання та шорсткості обробленої поверхні нечітким методом групового врахування аргументів / Вислоух С. П., Катрук О. В., Заїка А. І., // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування : збірник наукових праць. – 2008. – Вип. 36. – С. 89–95. – Бібліогр.: 5 назв.

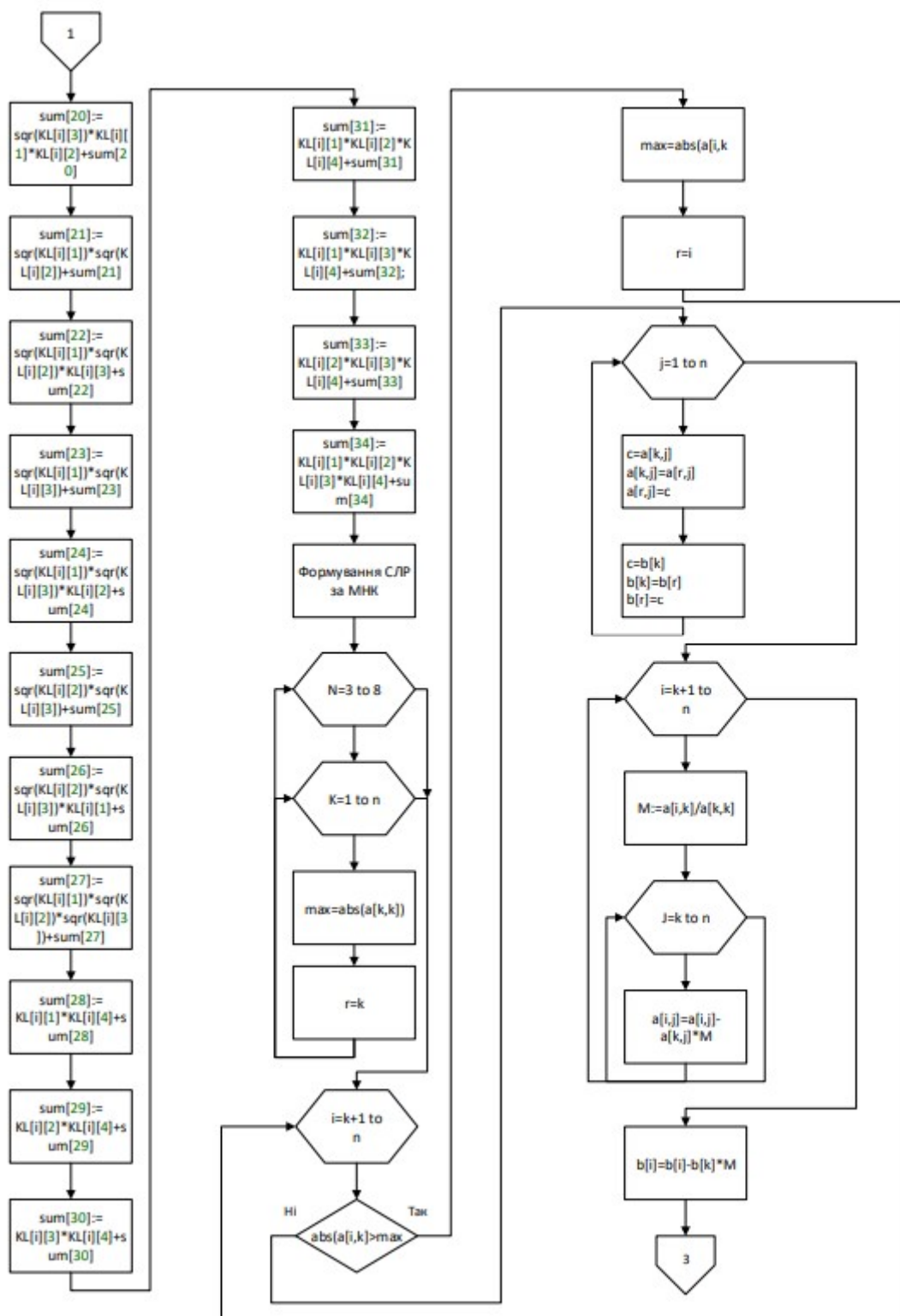
43. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мазур В.А., Самотугин С.С. Оптимизация технологических параметров процесса формирования упрочняющих покрытий. // Технологические системы. Киев. 2003 № 4. С.44–48.

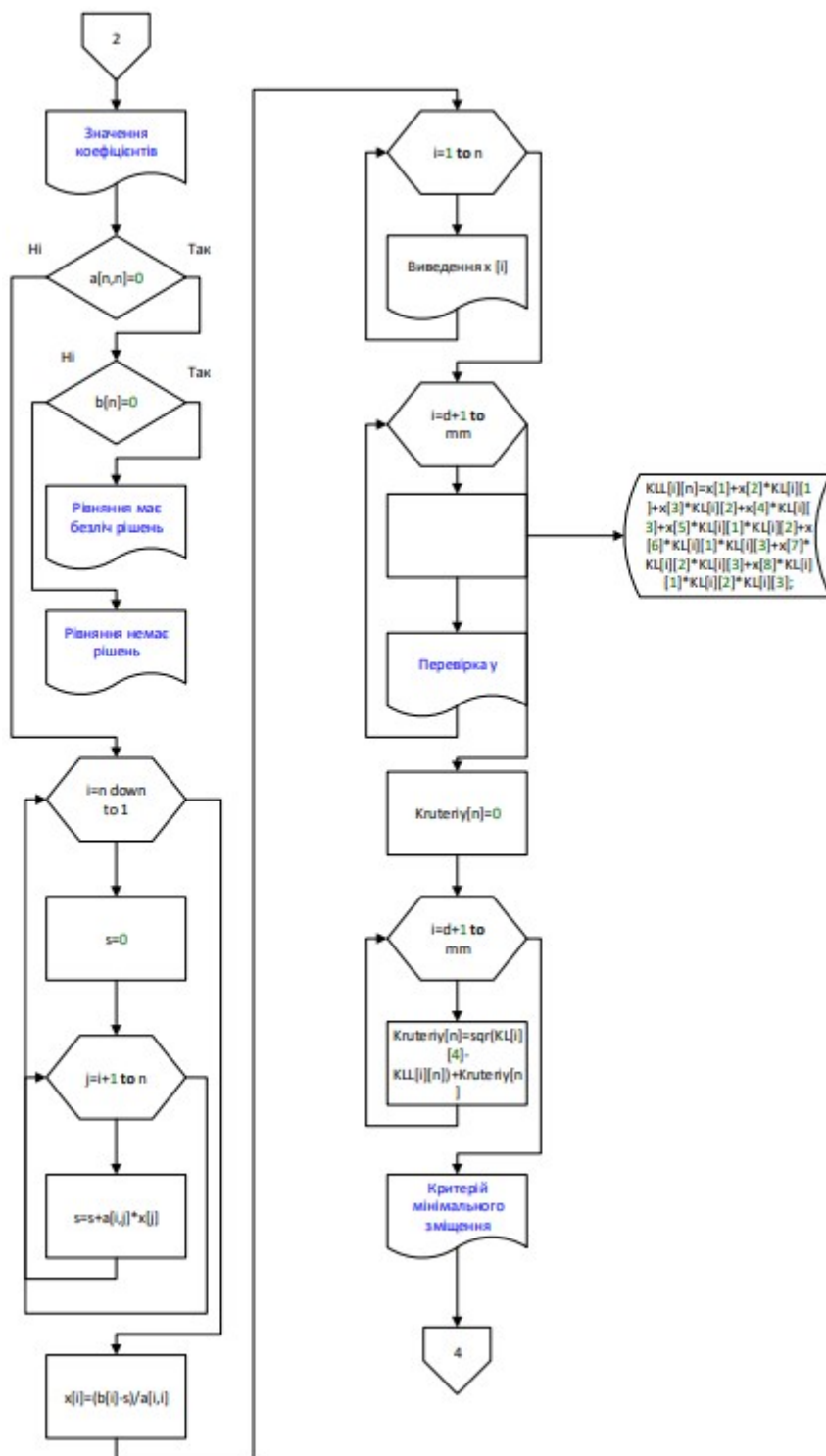
44. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

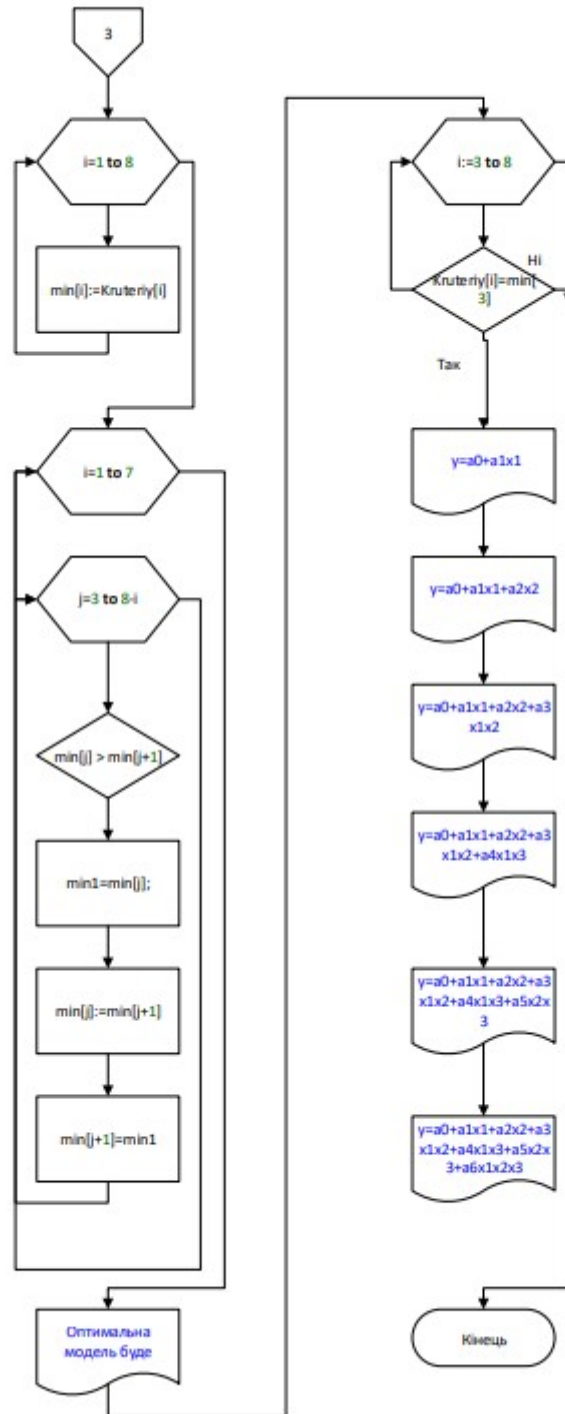
ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Програмне забезпечення







```

Код програмного забезпечення
program DI;
uses crt;
Var
f:text;
r,d,mm,nn,bb:integer;
max,c,s,M,min1:real;
a,KL, KLL, z:array [0..100,0..100] of real;
b,Kruteriy,min:array [1..100] of real;
x,sum:array [0..100] of real;
ss:string;
kt, kr:string;
begin
write('Введіть назву файлу, який містить вхідні дані: ');
readln(kt);
assign(f,kt);
reset(f);
mm:=1;
nn:=0;
while not eoln(f)do
begin
read(f,bb);
nn:=nn+1;
end;
readln(f,ss);
while not eof(f) do
begin
readln(f,kt);
mm:=mm+1;
end;
close(f);
reset(f);
for var i:=1 to mm do
begin
for var j:=1 to nn do
begin
read(f,KL[i,j]);
end;
end;
close(f);
gotoxy(40,5);
textcolor(15);
writeln('Курсова робота');
gotoxy(43,6);
writeln('на тему:');

```

```

writeln('Моделювання технологічних параметрів за допомогою
багаторядного алгоритму МГВА з зануленням коефіцієнтів');
gotoxy(32,8);
writeln('Виконала студентка групи ПБ-81мп');
gotoxy(34,9);
writeln('Прихожа Діана Володимирівна');
writeln;writeln;
writeln('Загальний поліном має такий вигляд');
writeln('y=a0+a1x1+a2x2+a3x3+a4x1x2+a5x1x3+a6x2x3+a7x1x2x3');
writeln;
textcolor(green);
writeln('Відбувається процес занулення коефіцієнтів');
delay(3000);
writeln;
d:=round(int(mm*0.7)) ;
d:=mm;
for var j:=1 to d do begin //sum x1, x2,x3,y
for var i:=1 to d do
sum[j]:= KL[i][j]+sum[j];
end;
for var i:=1 to d do begin
sum[5]:= KL[i][1]*KL[i][2]+sum[5];// x1x3
sum[6]:= KL[i][1]*KL[i][3]+sum[6];// x2x3
sum[7]:= KL[i][2]*KL[i][3]+sum[7];// x1x2x3
sum[8]:= KL[i][1]*KL[i][2]*KL[i][3]+sum[8];// x1x1
sum[9]:= sqr(KL[i][1])+sum[9];// x1x1x2
sum[10]:= sqr(KL[i][1])*KL[i][2]+sum[10];// x1x1x3
sum[11]:= sqr(KL[i][1])*KL[i][3]+sum[11];// x1x1x2x3
sum[12]:= sqr(KL[i][1])*KL[i][2]*KL[i][3]+sum[12];// x2x2
sum[13]:= sqr(KL[i][2])+sum[13];// x2x2x1
sum[14]:= sqr(KL[i][2])*KL[i][1]+sum[14];// x2x2x3
sum[15]:= sqr(KL[i][2])*KL[i][3]+sum[15];// x2x2x1x3
sum[16]:= sqr(KL[i][2])*KL[i][1]*KL[i][3]+sum[16];// x3x3
sum[17]:= sqr(KL[i][3])+sum[17];// x3x3x1
sum[18]:= sqr(KL[i][3])*KL[i][1]+sum[18];// x3x3x2
sum[19]:= sqr(KL[i][3])*KL[i][2]+sum[19];// x3x3x1x2
sum[20]:= sqr(KL[i][3])*KL[i][1]*KL[i][2]+sum[20]; // x1^2x2^2
sum[21]:= sqr(KL[i][1])*sqr(KL[i][2])+sum[21];// x1^2x2^2 x3
sum[22]:= sqr(KL[i][1])*sqr(KL[i][2])*KL[i][3]+sum[22];// x1^2x3^2
sum[23]:= sqr(KL[i][1])*sqr(KL[i][3])+sum[23];// x1^2x3^2 x2
sum[24]:= sqr(KL[i][1])*sqr(KL[i][3])*KL[i][2]+sum[24];// x2^2x3^2
sum[25]:= sqr(KL[i][2])*sqr(KL[i][3])+sum[25]; // x2^2x3^2 x1
sum[26]:= sqr(KL[i][2])*sqr(KL[i][3])*KL[i][1]+sum[26];// x1^2x2^2x3^2
sum[27]:= sqr(KL[i][1])*sqr(KL[i][2])*sqr(KL[i][3])+sum[27];// x1y
sum[28]:= KL[i][1]*KL[i][4]+sum[28];// yx2

```

```

sum[29]:= KL[i][2]*KL[i][4]+sum[29];// yx3
sum[30]:= KL[i][3]*KL[i][4]+sum[30]; // yx1x2
sum[31]:= KL[i][1]*KL[i][2]*KL[i][4]+sum[31];// yx1x3
sum[32]:= KL[i][1]*KL[i][3]*KL[i][4]+sum[32]; // yx2x3
sum[33]:= KL[i][2]*KL[i][3]*KL[i][4]+sum[33]; // yx2x3
sum[34]:= KL[i][1]*KL[i][2]*KL[i][3]*KL[i][4]+sum[34];
end;

//перша модель
//y:=a0+a1x1+a2x2;

for var n:=3 to 8 do begin
  a[1][1]:=d;          a[1][2]:=sum[1];   a[1][3]:=sum[2];   a[1][4]:=sum[3];
a[1][5]:=sum[5];   a[1][6]:=sum[6];   a[1][7]:=sum[7]; a[1][8]:=sum[8];   b[1]:=
sum[4];
  a[2][1]:=sum[1];   a[2][2]:=sum[9];   a[2][3]:=sum[5];   a[2][4]:=sum[6];
a[2][5]:=sum[10];   a[2][6]:=sum[11];   a[2][7]:=sum[8];   a[1][8]:=sum[12];
b[2]:=sum[28];
  a[3][1]:=sum[2];   a[3][2]:=sum[5];   a[3][3]:=sum[13]; a[3][4]:=sum[7];
a[3][5]:=sum[14];   a[3][6]:=sum[8];   a[3][7]:=sum[15];a[1][8]:=sum[16];
b[3]:=sum[29];
  a[4][1]:=sum[3];   a[4][2]:=sum[6];   a[4][3]:=sum[7];
a[4][4]:=sum[17];a[4][5]:=sum[8];   a[4][6]:=sum[18];
a[4][7]:=sum[19];a[1][8]:=sum[20]; b[4]:=sum[30];
  a[5][1]:=sum[5];   a[5][2]:=sum[10]; a[5][3]:=sum[14]; a[5][4]:=sum[8];
a[5][5]:=sum[21];   a[5][6]:=sum[12];   a[5][7]:=sum[16];a[1][8]:=sum[22];
b[5]:=sum[31];
  a[6][1]:=sum[6];   a[6][2]:=sum[11];   a[6][3]:=sum[8];
a[6][4]:=sum[18];a[6][5]:=sum[12];   a[6][6]:=sum[23];
a[6][7]:=sum[20];a[1][8]:=sum[24]; b[6]:=sum[32];
  a[7][1]:=sum[7];   a[7][2]:=sum[8];   a[7][3]:=sum[15];
a[7][4]:=sum[19];a[7][5]:=sum[16];   a[7][6]:=sum[20];
a[7][7]:=sum[25];a[1][8]:=sum[26]; b[7]:=sum[33];
  a[8][1]:=sum[8];   a[8][2]:=sum[12];   a[8][3]:=sum[16];
a[8][4]:=sum[20];a[8][5]:=sum[22];   a[8][6]:=sum[24];
a[8][7]:=sum[26];a[1][8]:=sum[27]; b[8]:=sum[34];
  // begin
  for var k:=1 to n do
  begin
    max:=abs(a[k,k]);
    r:=k;
    for var i:=k+1 to n do
    if abs(a[i,k])>max then
    begin
      max:=abs(a[i,k]);

```

```

r:=i;
end;
for var j:=1 to n do
begin
c:=a[k,j];
a[k,j]:=a[r,j];
a[r,j]:=c;
end;
c:=b[k];
b[k]:=b[r];
b[r]:=c;
for var i:=k+1 to n do
begin
M:=a[i,k]/a[k,k];
for var j:=k to n do
begin
a[i,j]:=a[i,j]-a[k,j]*M;
end;
b[i]:=b[i]-b[k]*M;
end;
end;
writeln;
Writeln('Значення коефіцієнтів:');
Writeln;
if a[n,n]=0 then
if b[n]=0 then
Writeln('Рівняння має безліч рішень')
else
Writeln('Рівняння немає рішень')
else
begin
for var i:=n downto 1 do
begin
s:=0;
for var j:=i+1 to n do
begin
s:=s+a[i,j]*x[j];
end;
x[i]:=(b[i]-s)/a[i,i];
end;
for var i:=1 to n do
Writeln('a[' ,i, ']=' ,x[i]:5:2);
end;
//end
for var i:=1 to n do

```

```

z[i][n]:=x[i];

Writeln;
for var i:=1 to mm do begin
  KLL[i][n]:=x[1]+x[2]*KL[i][1]+x[3]*KL[i][2]+x[4]*KL[i][3]+x[5]*KL[i][1]*
KL[i][2]+x[6]*KL[i][1]*KL[i][3]+x[7]*KL[i][2]*KL[i][3]+x[8]*KL[i][1]*KL[i][2]*
KL[i][3];
  Writeln('Перевірка y['i,']=',KLL[i][n]);
end;
//перевірка
Writeln;
Writeln('Пізниття значень');
for var i:=1 to mm do begin
  KLL[i][n]:=x[1]+x[2]*KL[i][1]+x[3]*KL[i][2]+x[4]*KL[i][3]+x[5]*KL[i][1]*
KL[i][2]+x[6]*KL[i][1]*KL[i][3]+x[7]*KL[i][2]*KL[i][3]+x[8]*KL[i][1]*KL[i][2]*
KL[i][3];
  Writeln('Перевірка ур-уд['i,']=',KLL[i][n]-KL[i][nn]);
end;
Kruteriy[n]:=0;
for var i:=round(int(mm*0.7)+1) to mm do begin
  Kruteriy[n]:=Kruteriy[n]+(sqr(KL[i][nn]-KLL[i][n]))/(sqr(KL[i][nn]));
end;
Writeln;
writeln('Критерій регулярності ',n-2,' моделі = ',Kruteriy[n]:30:30);
end;

for var i:=1 to 8 do begin
  min[i]:=Kruteriy[i];
end;
for var i:=1 to 7 do
  for var j:=3 to 8-i do
    if min[j] > min[j+1] then begin
      min1:=min[j];
      min[j]:=min[j+1];
      min[j+1]:=min1;
    end;
  writeln;
  delay(1000);
  textcolor(15);
  write('Оптимальна модель ');
  for var i:=3 to 8 do begin
    if(Kruteriy[i]=min[3]) then
      case i of

```

```

3 : writeln ('під номером 1(один) та матиме такий вигляд
y=',z[1][3]:5:2,'+',z[2][3]:5:2,'x1+',z[3][3]:5:2,'x2');
4 : writeln ('під номером 2(два) та матиме такий вигляд
y=',z[1][4]:5:2,'+',z[2][4]:5:2,'x1+',z[3][4]:5:2,'x2+',z[4][4]:5:2,'x3');
5 : writeln ('під номером 3(три) та матиме такий вигляд
y=',z[1][5]:5:2,'+',z[2][5]:5:2,'x1+',z[3][5]:5:2,'x2+',z[4][5]:5:2,'x3+',z[5][5]:5:2,'x1x2
');
6 : writeln ('під номером 4(чотири) та матиме такий вигляд
y=',z[1][6]:5:2,'+',z[2][6]:5:2,'x1+',z[3][6]:5:2,'x2+',z[4][6]:5:2,'x3+',z[5][6]:5:2,'x1x2
+',z[1][6]:5:2,'x1x3');
7 : writeln ('під номером 5(п'ять) та матиме такий вигляд
y=',z[1][7]:5:2,'+',z[2][7]:5:2,'x1+',z[3][7]:5:2,'x2+',z[4][7]:5:2,'x3+',z[5][7]:5:2,'x1x2
+',z[6][7]:5:2,'x1x3+',z[7][7]:5:2,'x2x3');
8 : writeln ('під номером 6(шість) та матиме такий вигляд
y=',z[1][8]:5:2,'+',z[2][8]:5:2,'x1+',z[3][8]:5:2,'x2+',z[4][8]:5:2,'x3+',z[5][8]:5:2,'x1x2
+',z[6][8]:5:2,'x1x3+',z[7][8]:5:2,'x2x3+',z[8][8]:5:2,'x1x2x3');
end;
end;
write('Введіть назву файлу, який містить вихідні дані: ');
readln(kr);
write('Результати записано у вказаний файл');
assign(f,kr);
rewrite (f);
writeln(f,'Курсова робота');
writeln(f,'на тему:');
writeln(f,'Моделювання технологічних параметрів за допомогою
багаторядного алгоритму МГВА з зануленням коефіцієнтів');
writeln(f,'Виконала студентка групи ПБ-81мп');
writeln(f,'Прихожа Д.В. ');
Writeln;
Writeln (f,'Дійсні значення');
for var i:=1 to mm do begin
Writeln(f,'уд['i,']=',KL[i][nn]);
end;
Writeln;
Writeln (f,'Розрахункові значення');
for var i:=1 to mm do begin
KLL[i][nn]:=x[1]+x[2]*KL[i][1]+x[3]*KL[i][2]+x[4]*KL[i][3]+x[5]*KL[i][1]
*KL[i][2]+x[6]*KL[i][1]*KL[i][3]+x[7]*KL[i][2]*KL[i][3]+x[8]*KL[i][1]*KL[i][2]
*KL[i][3];
Writeln(f,'уд['i,']=',KLL[i][nn]);
end;
Writeln;
writeln(f,'Оптимальна модель буде мати вигляд');
for var i:=3 to 8 do begin

```

```

if(Kruteriy[i]=min[3]) then
case i of
3 : writeln (f, y=',z[1][3]:5:2,+',z[2][3]:5:2,'x1+',z[3][3]:5:2,'x2');
4      :      writeln (f,
y=',z[1][4]:5:2,+',z[2][4]:5:2,'x1+',z[3][4]:5:2,'x2+',z[4][4]:5:2,'x3');
5      :      writeln (f,
y=',z[1][5]:5:2,+',z[2][5]:5:2,'x1+',z[3][5]:5:2,'x2+',z[4][5]:5:2,'x3+',z[5][5]:5:2,'x1x2
');
6      :      writeln (f,
y=',z[1][6]:5:2,+',z[2][6]:5:2,'x1+',z[3][6]:5:2,'x2+',z[4][6]:5:2,'x3+',z[5][6]:5:2,'x1x2
+',z[1][6]:5:2,'x1x3');
7      :      writeln (f,
y=',z[1][7]:5:2,+',z[2][7]:5:2,'x1+',z[3][7]:5:2,'x2+',z[4][7]:5:2,'x3+',z[5][7]:5:2,'x1x2
+',z[6][7]:5:2,'x1x3+',z[7][7]:5:2,'x2x3');
8      :      writeln (f,
y=',z[1][8]:5:2,+',z[2][8]:5:2,'x1+',z[3][8]:5:2,'x2+',z[4][8]:5:2,'x3+',z[5][8]:5:2,'x1x2
+',z[6][8]:5:2,'x1x3+',z[7][8]:5:2,'x2x3+',z[8][8]:5:2,'x1x2x3');
end;
end;
close (f);
end.

```

ДОДАТОК Б

Список наукових праць

Додаток Б

Форма 26

Список

наукових праць Прихожої Діани Володимирівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Назва	Видавництво, журнал (назва, номер, рік) чи номер авторського свідоцтва	Кількість друкованих сторінок	Прізвища співавторів
1	2	3	4	5
1	Вплив технологічних параметрів йонно-плазмового термоциклічного азотування на формування функціональних покриттів поверхонь деталей	XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (10-11 грудня 2019 р.), К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. –2019. – С. 153–156.	4	Д.В. Прихожа, В.С. Антонюк, А.В. Рутковский
2	Автоматизована система контролю вакууму в процесі йонно-плазмового термоциклічного азотування	Стан і перспективи: збірник праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє: Приладобудування». (15–17 травня 2019 р.) – Київ: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Центр учбової літератури. – 2019.- С. 193 – 196.	3	Прихожа Д.В., Антонюк В.С., Рутковский А.В.
3	Система контролю йонно-плазмового термоциклічного азотування	Зб. тез доповідей І-ї Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019”; (13–15 травня 2019 р.) – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К»	3	В.С. Антонюк, Д.В. Прихожа, А.В. Рутковский, та інші
4	Визначення параметрів фрагментованості зносостійкого покриття	Зб.Тез Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – С.–185.	1	Антонюк В.С., Прихожа Д.В., та інші

Додаток таблиці

116

5	Автоматизированная система управления температурой детали при ионно-плазменном термоциклическом азотировании	Сб. «Новые направления развития приборостроения» Материалы 12-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, (17–19 апреля 2019 года)– Минск. БНТУ, 2019.- С. 146.	1	Прихожа Д.В., Антонюк В.С., Рутковский А.В.
6	Комп'ютерне моделювання пружного стану різального інструменту	XI всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ» 15-16 травня 2018 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ	4	Нездоля Н.А., Антонюк В.С., Прихожа Д.В.
7	Створення високоміцних інтерференційних структур періодичними лазерними імпульсами	XX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «ЛЮДИНА І КОСМОС». 11-13 квітня 2018 року, Дніпро	1	Антонюк В.С. Прихожа Д.В.
8	Контроль вібрації зубчастих передач методом голографічної інтерферометрії	IV-а Міжнародна наукова конференція "ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ", Вінниця, 31 жовтня-2 листопада 2017р.	2	Прихожа Д.В., Катрук О.В.
9	Спосіб контролю процесу йонно-плазмового азотування	Заявка № u 2019 05937 від 30.05.2019 р.,	6	Антонюк В.С. Рутковський А.В. Прихожа Д.В.

Автор

(підпис)

Прихожа Д.В.

(прізвище, ініціали)

Декан ПБФ

(підпис)

Тимчик Г.С.

(прізвище, ініціали)



Декан приладобудівного факультету

Г.С. Тимчик

« 10 » 12 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження в освітній процес кафедри виробництва приладів
магістранта Прихожої Діани Володимирівни
на тему:

«Поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування»

Комісії у складі:

Голова – Заступник декана приладобудівного факультету з навчально-методичної роботи, к.т.н. доцент Філіппова М.В.;

Члени комісії: -в.о. завідувача кафедри виробництва приладів, д.т.н., професор Антонюк В. С.
-доцент кафедри виробництва приладів, к.т.н., доцент Вислоух С.П.

цим актом засвідчує те, що результати дисертаційного дослідження Прихожої Діани Володимирівни на тему: «Поверхнєве зміцнення деталей методом йонно-плазмового термоциклічного азотування» - а саме, вдосконалена технологія поверхнєвого зміцнення деталей приладів та інструменту методом йонно-плазмового термоциклічного азотування, що використовується при проведенні лекцій та лабораторних практикумів з навчальної дисципліни «Технологія приладобудування» викладачами кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Голова комісії М.В. Філіппова

Члени комісії В.С. Антонюк

С.П. Вислоух

« » 2019р.