

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Кафедра прикладного матеріалознавства і  
технології конструкційних матеріалів**

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

**зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

Тема роботи: Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення та термічної обробки деталі «голка дозуюча»

Виконав:

Піменов Олег Олегович

Керівник:

Харченко Надія Анатоліївна

Залікова книжка

№ 19510052

Підпис \_\_\_\_\_

Підпис \_\_\_\_\_

Захищена з оцінкою

\_\_\_\_\_

Оцінка, дата

Секретар ЕК

\_\_\_\_\_ Марченко К.С.

Прізвище, підпис

Суми 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

**Кафедра прикладного матеріалознавства і технології конструкційних матеріалів**

**Спеціальність 132 «Матеріалознавство»**

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Гарант освітньої програми  
«Прикладне матеріалознавство»  
Харченко Н. А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студенту Піменову Олегу Олеговичу, група МТ-91/1  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної роботи: Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення та термічної обробки деталі «голка дозуюча»

2. Вихідні дані: Креслення деталі «голка дозуюча» та вимоги до неї вказані на кресленні (додаток А), графік режиму термічної обробки деталі «голка дозуюча» (додаток Б)

3. Перелік обов'язкового графічного матеріалу

- 1) Креслення деталі.
- 2) Графік термічної обробки деталі
- 3) План розробленого термічного відділення.

4. Етапи виконання випускної роботи:

№	Етапи і розділи проектування	Тижні			
		1	2	3	4
1	Розділ 1. Аналіз умов роботи деталі	X			
2	Розділ 2. Огляд літератури	X			
3	Розділ 3. Вибір матеріалу та роль легувальних елементів у забезпеченні експлуатаційних властивостей		X		
4	Розділ 4. Маршрутна технологія виготовлення деталі. Характеристика етапів технологічного процесу			X	
5	Розділ 5. Розрахунково-експериментальна частина				X

5. Дата видачі завдання 18 квітня \_\_\_\_\_ 2023 р.

Керівник \_\_\_\_\_

(підпис)

доцент, Харченко Н. А.

(посада, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Випускна кваліфікаційна робота: складається з 53 сторінок, 5 розділів, 16 рисунків, 7 таблиць, 42 літературних джерел, 2 додатки на 2 сторінках.

Об'єкт дослідження: голка дозуюча зі сталі 14X17H2.

**Мета роботи** – проведення критичного аналізу умов експлуатації деталі «голка дозуюча», вибір та рекомендація щодо матеріалу та прогресивної маршрутної технології виготовлення і термічної обробки готового виробу.

**Завдання:** проаналізувати умови роботи деталі; провести аналітичний огляд відповідної технічної літератури, раціональний вибір матеріалу для виготовлення деталі, розробити технологічний процес та термічну обробку виробу з оптимального комплексного методу термічної та хіміко-термічної обробки.; підібрати основне обладнання термічної дільниці.

В ході роботи була проведена аналітична робота, включаючи аналіз умов експлуатації деталі «голка дозуюча» та формулювання вимог до матеріалів, з яких вона виготовляється. Засновуючись на результатах літературного огляду, був обраний основний матеріал для виготовлення деталі. Розроблена маршрутна технологія виготовлення голки дозуючої, а також запропонований оптимальний режим термічної обробки деталі з метою підвищення її твердості, міцності та стійкості до міжкристалітної корозії.

**Методи дослідження** – металографічний аналіз, визначення твердості, мікротвердості, визначення стійкості до мікрісталітної корозії. Експериментальну частину роботи проводили на сучасному обладнанні в лабораторних умовах.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ГОЛКА ДОЗУЮЧА, 14X17H2, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ЦАНУВАННЯ, ОБЛАДНАННЯ

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 .....	8
ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛІ.....	8
1.2 Причини виходу з ладу .....	10
1.3 Висновки .....	10
РОЗДІЛ 2 .....	12
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	12
2.1 Матеріали для виготовлення деталі «голка дозуюча».....	12
2.2 Технології виготовлення деталі «голка дозуюча» .....	16
2.3 Методи поверхневої обробки нержавіючої сталі.....	17
2.4 Висновки .....	20
РОЗДІЛ 3 .....	22
ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	22
3.1 Вибір матеріалу та опис впливу легуючих елементів на властивості деталі .....	22
3.2 Методи дослідження .....	24
3.3 Мікроструктурний аналіз .....	26
3.3. Випробування на макро- і мікротвердість.....	28
3.3.1 Методи визначення макротвердості.....	28
3.3.2 Мікротвердість .....	33
3.4 Висновки .....	35
РОЗДІЛ 4 .....	37
РОЗРОБКА МАРШРУТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ .....	37

4.1 Розробка маршрутної технології виготовлення деталі.....	37
4.2 Висновки .....	39
РОЗДІЛ 5 .....	40
РОЗРАХУНКОВО – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	40
5.1 Термічна обробка деталі.....	40
5.2 Хіміко-термічна обробка деталі «голка дозуюча».....	43
5.3 Основне обладнання термічної обробки.....	46
5.4 Висновки .....	52
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	55
Додаток А.....	61
Додаток Б.....	62

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Виробництво безпечних та надійних компонентів для паливної системи літака — є однією з найважливіших задач в авіаційній індустрії. У цьому контексті коректний вибір відповідного матеріалу для виготовлення деталі «голка дозуюча» має вирішальне значення.

В авіації важливість кожного компонента, незалежно від його розміру, неможливо переоцінити. Кожна деталь робить свій внесок у загальну безпеку та ефективність роботи літальних апаратів. Серед цих компонентів "дозуюча голка" відіграє ключову роль. Цей елемент, частина паливної системи, відповідає за регулювання подачі палива в двигун. Точність і надійність його роботи безпосередньо впливають на безпеку польоту та економію палива, що робить його невід'ємною частиною літакобудування.

Для покращення властивостей матеріалу деталі застосовуються процеси термічної обробки, які покращують експлуатаційні характеристики дозуючої голки. Ці процеси можуть підвищити міцність і твердість нержавіючої сталі, покращити її стійкість до міжкристалітної корозії та зносу і, таким чином, перетворити її на більш ефективний та довговічний матеріал. Актуальність термічної обробки особливо помітна для нержавіючих сталей.

У цьому дослідженні ми пропонуємо комплексний метод термічної та хіміко-термічної обробки для дозуючої голки. Він включає попередню термічну обробку (див. Додаток Б), рідинне азотування, цементацію та остаточну термічну обробку. Цей процес призначений для підвищення твердості, міцності та загальної продуктивності дозуючої голки, тим самим підвищуючи її надійність та ефективність в паливній системі літака.

Актуальність цієї теми дослідження підкреслюється критичною роллю, яку відіграє дозуюча голка в експлуатації літаків. Оскільки авіаційна промисловість продовжує розвиватися і розширювати межі технологій, потреба в більш

ефективних і надійних компонентах стає все більш важливою. Це дослідження відповідає сучасним дослідницьким тенденціям, спрямованим на підвищення продуктивності та надійності критично важливих компонентів.

**Мета роботи** – проведення критичного аналізу умов експлуатації деталі «голка дозуюча», вибір та рекомендація щодо матеріалу та прогресивної маршрутної технології виготовлення і термічної обробки готового виробу.

**Завдання:** проаналізувати умови роботи деталі; провести аналітичний огляд відповідної технічної літератури, раціональний вибір матеріалу для виготовлення деталі, розробити технологічний процес та термічну обробку виробу з оптимального комплексного методу термічної та хіміко-термічної обробки.; підібрати основне обладнання термічної дільниці.

## РОЗДІЛ 1

### ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛІ

#### 1.1 Аналіз умов роботи деталі

Основна функція дозуючої голки (Рисунок 1.1, Додаток А) полягає в регулюванні подачі палива в двигун. Для цього вона змінює своє положення в паливній системі, щоб контролювати кількість палива, яка може пройти через неї. Таке регулювання подачі палива має вирішальне значення для підтримки оптимальної паливно-повітряної суміші для згоряння в двигуні, що безпосередньо впливає на його продуктивність і економічність.

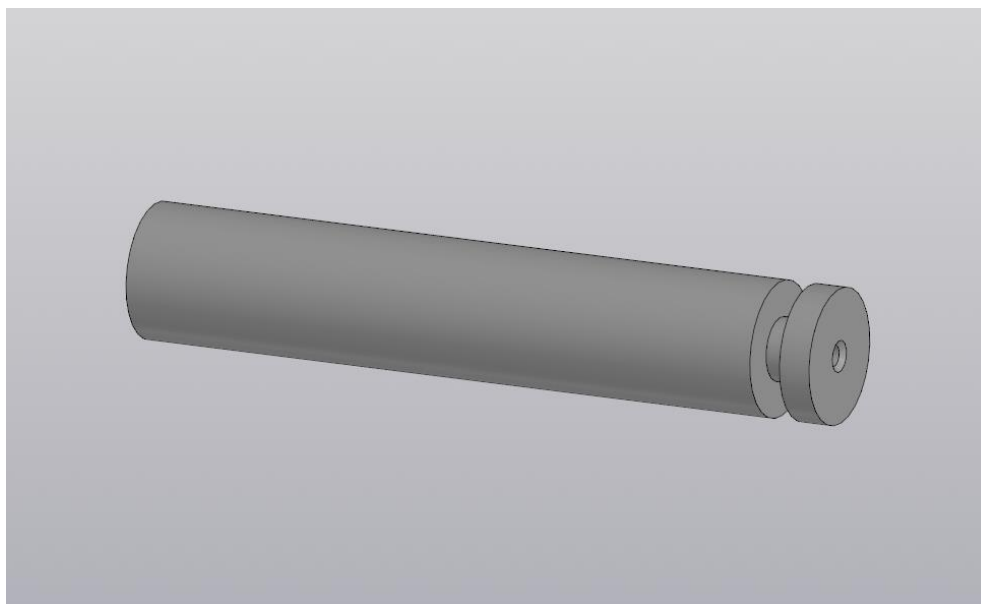


Рисунок 1.1 — 3D модель деталі «дозуюча голка»

Деталь «голка дозуюча» використовується у насосі-регуляторі для зміни подачі палива до форсунки в залежності від потреб двигуна. Робота голки дозуючої деталі впливає на частоту обертання турбокомпресора і вільної турбіни (несучого гвинта), що в свою чергу регулює подачу палива в камеру згоряння.

Зміна положення голки дозуючої деталі дозволяє контролювати кількість палива, яка подається до форсунки. Зменшення дози палива призводить до зменшення частоти обертання турбокомпресора і вільної турбіни, тоді як



збільшення дози палива збільшує частоту обертання. Це покращує контроль над процесом згорання і дозволяє досягти оптимальної продуктивності та ефективності двигуна.

Для налаштування дози палива використовується сервомеханізм голки. Цей механізм налаштовується таким чином, щоб при певній подачі палива частота обертання несучого гвинта залишалась постійною. Це досягається за допомогою синхронізатора потужності, який забезпечує однакові режими паралельно працюючих двигунів вертолітної силової установки.

На умови роботи дозуючої голки впливають декілька факторів:

- **Тиск:** дозуюча голка працює в умовах високого тиску, оскільки вона контролює подачу палива від насоса до інжектора. Вона повинна витримувати цей тиск без деформації або пошкодження.
- **Температура:** паливна система може сильно нагріватися, особливо під час тривалих польотів. Дозуюча голка повинна витримувати ці високі температури без втрати своєї функціональності.
- **Вібрації:** деталь також піддається вібрації від двигуна. Вона повинна витримувати ці вібрації, для запобігти її зносу.
- **Хімічні умови:** голка постійно контактує з авіаційним паливом, яке може бути корозійно активним. Вона повинна бути виготовлена зі стійкого до корозії матеріалу.
- **Механічні навантаження:** дозуюча голка є рухомою частиною, яка постійно регулює подачу палива. З часом це може призвести до механічних навантажень, які голка повинна витримувати.

Таким чином, дозуюча голка працює в унікальних умовах, які вимагають від неї міцності, надійності та точності. Розуміння цих умов має вирішальне значення для проектування та виготовлення голки, а також для розробки покращених матеріалів і процесів обробки для підвищення її продуктивності та довговічності.

## 1.2 Причини виходу з ладу

**Механічні пошкодження:** може включати знос, тріщини або деформації, які можуть виникнути в результаті високого тиску палива, високих температур або вібрації двигуна. Механічні пошкодження можуть призвести до неправильного регулювання подачі палива, що може вплинути на ефективність двигуна та безпеку польоту.

**Корозія:** корозія є ще однією поширеною причиною виходу з ладу голки дозуючої. Навіть якщо високолегована неіржавіюча сталь 14X17H2 має високу корозійну стійкість, довготривала експлуатація в корозійних умовах може призвести до пошкодження матеріалу. Корозія може змінити геометрію голки, що призведе до неправильного дозування палива.

**Термічні пошкодження:** високі температури, які виникають в двигуні, можуть призвести до термічних пошкоджень голки дозуючої. Це може включати окислення, виснаження або деформацію матеріалу. Термічні пошкодження можуть змінити механічні властивості голки та її здатність регулювати подачу палива.

**Неправильна термічна обробка:** неправильна термічна обробка може призвести до виходу з ладу голки дозуючої. Не правильна термічна обробка може призвести до неправильного формування мікроструктури сталі, що може знизити її міцність, твердість та корозійну стійкість. Це може призвести до прискореного зносу голки та її раннього виходу з ладу.

**Забруднення палива** може також призвести до виходу з ладу голки дозуючої. Частинки забруднень можуть застрягти в голці або пошкодити її поверхню, що призведе до неправильного дозування палива. Це може призвести до нерівномірного горіння в двигуні та зниження його ефективності.

## 1.3 Висновки

Дозуюча голка є важливим компонентом паливної системи двигуна, яка

регулює подачу палива для забезпечення оптимальної паливно-повітряної суміші для згоряння. Вона працює в умовах високого тиску, високих температур, вібрацій, хімічних впливів та механічних навантажень, що вимагає від неї міцності, надійності та точності.

Однак, незважаючи на її важливість, голка дозуюча може вийти з ладу з різних причин, включаючи механічні пошкодження, корозію, термічні пошкодження, неправильну термічну обробку та забруднення палива. Ці проблеми можуть призвести до неправильного регулювання подачі палива, що може вплинути на ефективність двигуна та безпеку польоту.

Тому, для забезпечення надійної роботи дозуючої голки, необхідно враховувати всі ці фактори під час проектування та виготовлення голки, а також під час її експлуатації. Це включає вибір відповідних матеріалів, правильне термічне оброблення, регулярне технічне обслуговування та контроль якості палива.

## РОЗДІЛ 2

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 2.1 Матеріали для виготовлення деталі «голка дозуюча»

Аналіз призначення і основних умов роботи деталі «голка дозуюча», врахування всіх вимог, які висуваються до готового виробу були сформовані основні вимоги до матеріалу. Рекомендовано в якості матеріалу, який задовольняє вимогам до голки дозуючої, використовувати нержавіючі сталі.

Нержавіючі сталі – це група корозійностійких сплавів, які широко використовуються в різних галузях промисловості завдяки своїм механічним властивостям, високій корозійній стійкості та привабливому зовнішньому вигляду.

Нержавіюча сталь в основному складається з заліза (Fe) як основного металу, а також значної кількості хрому (Cr). Мінімальний вміст хрому, необхідний для того, щоб сталь вважалася нержавіючою, зазвичай становить 12 %.

Характеристики нержавіючих сталей:

- **Стійкість до корозії:** Нержавіюча сталь відома своєю винятковою корозійною стійкістю. Ця властивість в першу чергу пояснюється наявністю хрому, який утворює на поверхні сталі тонкий оксидний шар, що самовідновлюється, відомий як пасивний шар. Цей оксидний шар діє як бар'єр, захищаючи основну сталь від корозії, спричиненої вологою, хімічними речовинами та іншими корозійними агентами. Чим вищий вміст хрому, тим вища корозійна стійкість нержавіючої сталі. Деякі види нержавіючої сталі також містять додаткові легуючі елементи, такі як молібден і азот, які ще більше підвищують їхню стійкість до специфічних корозійних середовищ, таких як розчини, що містять хлориди [1].
- **Міцність і в'язкість:** Нержавіючі сталі пропонують хороший баланс міцності та в'язкості. Вони мають високу міцність на розрив, що означає

їхню здатність витримувати зусилля розтягування або розтягування без деформації або руйнування. Нержавіючі сталі також демонструють хорошу межу текучості, тобто максимальне навантаження, яке матеріал може витримати без постійної деформації. Крім того, нержавіючі сталі мають хорошу в'язкість, тобто здатність поглинати енергію і протистояти руйнуванню при ударі або раптових навантаженнях [1]. Міцність і в'язкість нержавіючої сталі можна додатково підвищити за допомогою термічної обробки та легуючих елементів, таких як нікель, молібден і азот.

- **Термостійкість:** Багато нержавіючих сталей зберігають свої механічні властивості при підвищених температурах, що робить їх придатними для застосування в умовах високих температур. Аустенітні нержавіючі сталі, зокрема, демонструють хорошу термостійкість і можуть зберігати свою міцність і корозійну стійкість при високих температурах. Феритні нержавіючі сталі також мають хорошу стійкість до окислення при підвищених температурах [2]. Ці високотемпературні властивості роблять нержавіючі сталі цінними в таких галузях, як енергетика, аерокосмічна та автомобільна промисловість, де компоненти працюють у складних температурних умовах.
- **Гігієнічні властивості:** Нержавіючі сталі широко застосовуються в таких галузях, як харчова промисловість, фармацевтика та медичне обладнання, завдяки своїм гігієнічним властивостям і простоті очищення. Нержавіюча сталь має гладку, непористу поверхню, яка пригнічує ріст бактерій і полегшує ретельне очищення та стерилізацію [3]. Нержавіюча сталь не вступає в реакцію з харчовими продуктами та хімічними речовинами, що забезпечує збереження смаку, цілісності та чистоти оброблюваних матеріалів.
- **Обробка та формованість:** Нержавіючі сталі добре піддаються формуванню, що дозволяє надавати їм різної складної геометрії за допомогою таких процесів, як згинання, зварювання, механічна обробка та формування. Вони демонструють чудову пластичність, що дозволяє

втягувати їх у дріт або формувати в складні компоненти. Нержавіючі сталі також відомі своєю легкістю у виробництві, оскільки їх можна легко різати, зварювати та з'єднувати за допомогою звичайних методів.

- **Придатність до вторинної переробки:** Нержавіючі сталі добре піддаються вторинній переробці, що робить їх екологічно чистими. Їх можна переплавляти і використовувати повторно без значної втрати якості або властивостей [4]. Переробка нержавіючої сталі допомагає зберегти ресурси, зменшити споживання енергії та звести до мінімуму утворення відходів, що сприяє сталому розвитку.

Методи та матеріали для ідентифікації нержавіючої сталі:

1. **Використання магнітних металів:** Нержавіюча сталь, особливо фероаустенітні сплави, не має магнітних властивостей через наявність нікелю та хрому. За допомогою магніту можна визначити, чи є виріб з нержавіючої сталі магнітним чи ні.

2. **Випробування в соловому розчині:** Нержавіюча сталь стійка до корозії і може витримувати вплив агресивних середовищ. Зануривши виріб з нержавіючої сталі в соляну ванну на добу, можна спостерігати, чи відбуваються якісь корозійні процеси [5]. Якщо корозії не спостерігається, це свідчить про справжність нержавіючої сталі.

3. **Метод розрізу:** Зробивши поперечний зріз виробу з нержавіючої сталі і проаналізувавши його колірну гамму, можна визначити його склад. Різні марки нержавіючої сталі мають різні кольорні характеристики.

4. **Фізичний метод:** Цей метод полягає у витісненні рідини з посудини за допомогою досліджуваного металу. Об'єми рідини, витісненої різними металами, відрізняються, що дозволяє відрізнити нержавіючу сталь від інших металів.

5. **Маркування:** Ліцензовані виробники часто маркують свої вироби з нержавіючої сталі відповідною інформацією про марку та властивості сталі.

Перевірка наявності такого маркування може допомогти відрізнити нержавіючу сталь від брухту або подробленої продукції.

**6. Метод чистого аркуша:** Цей метод використовується для того, щоб відрізнити нержавіючу сталь від алюмінію. Нержавіюча сталь не залишає слідів на чистому папері, в той час як алюміній залишає.

**7. Тест з азотною кислотою:** Азотна кислота реагує з вуглецевою сталлю, але не реагує з нержавіючою сталлю, що містить добавки. Нанесення азотної кислоти на поверхню металу може допомогти визначити, чи це нержавіюча сталь чи ні.

**8. Виявлення іскри:** Різні метали дають різні іскри при обробці шліфувальною машиною. Вуглецеві сплави дають білі іскри, в той час як титан викликає яскраві спалахи [5]. Спостереження за іскрами може допомогти у визначенні складу металу.

**9. Тест з реактивами:** Використання суміші перекису водню або 20% сульфату на поверхні металу може викликати характерну зміну кольору кольорових металів, яка може не відбуватися з брухтом.

**10. Світлий відтінок:** Нержавіюча сталь має виразний жовто-блакитний відтінок на поверхні, який може бути корисним для ідентифікації.

**11. Аналіз стружки:** Вивчення стружки з нержавіючої сталі і порівняння її з іншими металами, такими як дюралюміній, може виявити відмінності в кількості і зовнішньому вигляді, що допоможе в ідентифікації та запобіганні підробок.

Нержавіючі сталі мають ряд бажаних характеристик, включаючи корозійну стійкість, міцність, в'язкість, високотемпературні характеристики, гігієнічні властивості, естетичну привабливість, простоту виготовлення і можливість вторинної переробки. Ці властивості роблять нержавіючу сталь придатною для різноманітних застосувань у багатьох галузях промисловості, де надійність, довговічність і продуктивність є критично важливими факторами [6].

## 2.2 Технології виготовлення деталі «голка дозуюча»

Виготовлення дозуючої голки для авіабудування передбачає застосування різних технологій і процесів для забезпечення її точності, надійності та продуктивності. Ось деякі з ключових технологій, які зазвичай застосовуються у виробництві дозуючих голок:

1) **Механічна обробка:** Механічна обробка - це основний виробничий процес, який використовується для надання форми дозуючій голці з сировини. Обробка з числовим програмним управлінням (ЧПУ) часто використовується завдяки своїй високій точності та повторюваності [7]. Такі процеси обробки, як точіння, фрезерування, свердління та шліфування, використовуються для створення складних форм і розмірів голки, забезпечуючи її належну функціональність.

2) **Формування:** Методи формування, такі як холодне та гаряче формування, використовуються для надання дозуючій голці бажаної геометрії. Процеси холодного формування, включаючи згинання і штампування, застосовуються для досягнення певних кутів і форм. Процеси гарячого формування, такі як гаряче кування, можуть бути використані для покращення механічних властивостей голки, підвищення її міцності та довговічності [7].

3) **Термічна обробка:** Термічна обробка є важливим процесом для оптимізації механічних властивостей дозуючої голки. Він передбачає контрольоване нагрівання та охолодження голки для модифікації її мікроструктури та підвищення міцності, твердості та в'язкості. Залежно від конкретних вимог до матеріалу голки можуть застосовуватися такі методи термічної обробки, як відпал, гартування, відпуск і цементация.

4) **Обробка поверхні:** Методи обробки поверхні використовуються для покращення якості поверхні, корозійної стійкості та зносостійкості голки дозатора. Такі процеси, як гальванопокриття, пасивація та хімічне покриття, можуть бути застосовані для створення захисного шару або покращення



специфічних властивостей поверхні голки [8].

5) **Контроль якості:** Суворі заходи контролю якості мають важливе значення у виробництві голок для дозування, щоб забезпечити їх відповідність проектним специфікаціям і галузевим стандартам. Для перевірки якості та цілісності голок застосовуються такі методи контролю, як вимірювання розмірів, візуальний огляд, неруйнівний контроль (наприклад, ультразвуковий) та аналіз матеріалів (наприклад, спектроскопія) [9].

6) **Збірка та випробування:** Після того, як окремі компоненти дозуючих голок виготовлені, вони збираються в кінцевий продукт. Це може включати такі процеси, як зварювання, паяння або клейове з'єднання. Потім зібрана голка піддається ретельним випробуванням, включаючи функціональні випробування, випробування на герметичність і перевірку продуктивності, щоб переконатися, що вона відповідає необхідним стандартам і специфікаціям.

7) **Автоматизація та передові технології:** Досягнення в галузі автоматизації, робототехніки та адитивного виробництва (3D-друк) також вплинули на виробництво дозуючих голок. Автоматизовані системи можуть підвищити ефективність і точність, тоді як методи адитивного виробництва можуть запропонувати гнучкість дизайну і можливості швидкого створення прототипів.

Варто зазначити, що конкретні технології виробництва дозуючих голок можуть відрізнятися залежно від таких факторів, як матеріал, що використовується, складність конструкції голки, обсяг виробництва та технологічні досягнення в аерокосмічній галузі [7]. Виробники постійно прагнуть впроваджувати інноваційні методи і технології для вдосконалення виробничого процесу і оптимізації роботи дозуючих голок в авіабудуванні.

## 2.3 Методи поверхневої обробки нержавіючої сталі

Методи обробки поверхні нержавіючої сталі включають різні процеси, спрямовані на поліпшення властивостей поверхні, зовнішнього вигляду та

корозійної стійкості матеріалу:

1) **Шліфування:** шліфування – це процес, у якому використовуються абразивні частинки для видалення матеріалу з поверхні нержавіючої сталі. Зазвичай це виконується за допомогою шліфувальних кругів або абразивних стрічок. Шліфування допомагає отримати гладку поверхню, усунути недоліки поверхні та підвищити точність розмірів. Абразиви з різними розмірами зернистості можна використовувати для досягнення бажаної шорсткості поверхні та обробки [10].

2) **Полірування:** полірування – це метод обробки поверхні, який передбачає використання все більш дрібних абразивів для створення високовідбиваючої та гладкої поверхні. Це покращує естетичну привабливість нержавіючої сталі та покращує її чистоту. Полірування може бути виконано механічним шляхом за допомогою абразивних сумішей і полірувальних кругів або хімічним шляхом за допомогою спеціальних полірувальних розчинів.

3) **Електрополірування:** Електрополірування – це електрохімічний процес, який видаляє тонкий шар матеріалу з поверхні нержавіючої сталі. Зазвичай його використовують для отримання гладкої та яскравої поверхні. Деталь з нержавіючої сталі занурюється в розчин електроліту, і подається постійний електричний струм [11]. Електрополірування вибірково розчиняє високі точки на поверхні, що призводить до більш гладкого та однорідного покриття. Він також покращує корозійну стійкість нержавіючої сталі шляхом видалення поверхневих забруднень і посилення пасивного оксидного шару.

4) **Пасивація:** пасивація – це хімічний процес, який використовується для підвищення стійкості нержавіючої сталі до корозії. Це передбачає видалення вільного заліза та інших поверхневих забруднень, які можуть бути присутніми внаслідок механічної обробки або інших процесів. Пасивація зазвичай використовує кислотний розчин, такий як азотна кислота або лимонна кислота, для очищення поверхні та сприяння утворенню захисного шару пасивного оксиду [9]. Пасивована поверхня допомагає запобігти корозії та зберегти цілісність нержавіючої сталі.

5) **Травлення:** травлення – це хімічний процес, який видаляє поверхневі домішки, окалину та шари оксиду з нержавіючої сталі. Він передбачає занурення компонента з нержавіючої сталі в кислий розчин, наприклад, соляну або сірчану кислоту. Кислота реагує з оксидами поверхні та забрудненнями, розчиняючи їх і залишаючи поверхню чистою. Травлення часто виконується перед пасивацією або як окрема обробка для підготовки поверхні до подальшої обробки або для видалення стійких поверхневих плям [12].

6) **Гальванопластика.** Гальванопластика — це процес нанесення тонкого шару металу на поверхню нержавіючої сталі за допомогою електролізу. Він використовується для надання додаткових властивостей, таких як підвищена стійкість до корозії, покращена зносостійкість або естетична привабливість. Під час гальванічного покриття компонент з нержавіючої сталі занурюють у розчин електроліту, що містить іони металу. Потім подається електричний струм, який змушує іони металу осідати на поверхні нержавіючої сталі, утворюючи тонке та міцне металеве покриття [13].

7) **Фізичне осадження з парової фази (PVD):** PVD – це процес вакуумного осадження, який використовується для нанесення тонких покриттів на поверхні з нержавіючої сталі. Він передбачає випаровування твердого металу або сплаву у вакуумній камері, який потім конденсується на поверхні нержавіючої сталі, утворюючи тонку плівку [14]. Покриття PVD можуть надавати різні властивості, такі як покращена твердість, зносостійкість, стійкість до корозії та декоративне покриття. Звичайні матеріали PVD покриття включають нітрид титану, нітрид хрому та нітрид цирконію.

8) **Хімічне осадження з парової фази (CVD):** CVD – це процес, у якому тонка плівка матеріалу осаджується на поверхні нержавіючої сталі за допомогою хімічних реакцій газів-попередників. Компонент з нержавіючої сталі поміщають у реакційну камеру, і вводять гази-попередники. Гази реагують, утворюючи на поверхні тверду плівку [14]. CVD-покриття можуть надавати такі властивості, як стійкість до корозії, зносостійкість і стійкість до високих температур.

9) **Лазерна обробка поверхні:** лазерна обробка поверхні є точним і

локалізованим методом, що використовується для зміни властивостей поверхні нержавіючої сталі. Це передбачає використання лазерних променів високої енергії для нагрівання та розплавлення поверхні, що призводить до зміни мікроструктури та характеристик поверхні. Методи лазерної обробки поверхні включають лазерне зміцнення, лазерне легування, лазерне очищення та лазерне текстурування. Лазерна обробка може підвищити твердість, зносостійкість і стійкість до корозії поверхні з нержавіючої сталі [15].

Це деякі з поширених методів обробки поверхні нержавіючої сталі. Виробники можуть вибрати конкретні методи або комбінацію методів на основі бажаних властивостей поверхні, функціональних вимог і галузевих стандартів.

## 2.4 Висновки

Таким чином, нержавіюча сталь є дуже універсальним і широко використовуваним сплавом завдяки своїй винятковій корозійній стійкості, механічним властивостям і естетичній привабливості. Присутність хрому та інших легуючих елементів утворює захисний оксидний шар, який запобігає корозії, що робить нержавіючу сталь придатною для цілого ряду галузей промисловості та застосувань. Її міцність, в'язкість, жаростійкість і гігієнічні властивості також сприяють її широкому використанню.

Технології виробництва дозуючих голчастих деталей в аерокосмічній промисловості включають в себе поєднання механічної обробки, формування, термічної обробки, обробки поверхні, контролю якості, складання та випробувань. Ці процеси забезпечують точність, надійність і продуктивність дозуючих голок, а досягнення в галузі автоматизації та адитивного виробництва сприяють подальшому вдосконаленню.

Методи обробки поверхні нержавіючої сталі відіграють вирішальну роль у покращенні її властивостей та корозійної стійкості. Шліфування, полірування, електрополірування, пасивація, травлення, гальванопластика, PVD, CVD і лазерна обробка поверхні - ось деякі з використовуваних методів. Виробники

вибирають відповідні методи на основі бажаних характеристик поверхні, функціональних вимог і галузевих стандартів.

Поєднання бажаних характеристик нержавіючої сталі, технологій виробництва та методів обробки поверхні робить її ідеальним матеріалом для різних застосувань, де надійність, довговічність і продуктивність мають першорядне значення. Її постійний розвиток і екологічність завдяки переробці сприяють довгостроковій життєздатності в різних галузях промисловості.

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Вибір матеріалу та опис впливу легуючих елементів на властивості деталі

Сталь 14X17H2 по ГОСТ 5632-72 «Сталі високолеговані і сплави корозійностійкі, жаростійкі та жароміцні мартенситно-феритного класу, відноситься до групи корозійностійких (нержавіючих) сталей і сплавів, що володіють стійкістю проти електрохімічної та хімічної корозії (атмосферної, ґрунтової, лужної, кислотної, сольовий), міжкристалічної корозії, корозії під напругою і т.д [16]. У таблиці 3.1 наведено її хімічний склад.

Вибір відповідного матеріалу для конкретного компонента є важливим аспектом інженерного проектування та виробництва деталі. Робота деталі «дозуюча голка» безпосередньо впливає на безпеку та ефективність літака. Матеріал, з якого виготовляється голка, повинен відповідати ряду вимог, включаючи механічні властивості, такі як міцність і жорсткість, стійкість до корозії і зносу.

Сталь 14X17H2 була обрана завдяки своєму складу (Таблиця 3.1), що в свою чергу відповідає вимогам до властивостей, які роблять її придатною для застосування в паливній системі літака [17].

Таблиця 3.1

Хімічний склад зразків сталі 14X17H2 (ГОСТ 5632-72)

Сталь, марка	Вміст елементів, % по масі											
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	V	Mo	Cu	Ti
14X17H 2	0,11	0,4	0,38	0,004	0,028	17,16	1,61	0,02	0,04	0,07	0,13	0,005

Розглянемо властивості складових елементів сталі 14X17H2:

- **Вуглець (C):** Вуглець є основним елементом, який визначає міцність сталі. Він сприяє формуванню мартенситу під час закалювання, що забезпечує високу твердість та міцність сталі.
- **Хром (Cr):** Хром додає сталі корозійну стійкість. Він формує на поверхні сталі тонку плівку оксиду хрому, яка захищає сталь від корозії. Хром також покращує твердість сталі при високих температурах.
- **Нікель (Ni):** Нікель покращує загальну корозійну стійкість сталі та забезпечує кращу стійкість до міжкристалітної корозії. Він також покращує зварюваність сталі.
- **Марганець (Mn) та Силіцій (Si):** Ці елементи використовуються як деоксиданти, які допомагають видалити кисень з металу під час виробництва, щоб запобігти окисленню сталі.
- **Фосфор (P) та Сірка (S):** Ці елементи зазвичай вважаються небажаними домішками, оскільки вони можуть знизити міцність та корозійну стійкість сталі. Однак, в невеликих кількостях вони можуть покращити оброблюваність сталі.

Таблиця 3.2

Механічні властивості мартенситно-феритних сталей (ГОСТ 5949-75)

Сталь, марка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см
	не менше				
14X17H2	903	1148	20	58	59

Однією з ключових переваг сталі 14X17H2 є висока міцність і твердість, які є критично важливими для функції голки дозатора, що регулює подачу палива в двигун. Ці матеріали також мають відмінну стійкість до корозії і зносу, що важливо з огляду на суворі умови експлуатації паливної системи. Крім того, ці матеріали придатні для виробничих процесів, що використовуються для

виготовлення дозуючої голки, включаючи термічну та хіміко-термічну обробку [18].

### 3.2 Методи дослідження

Найбільш широке застосування сталь 14X17H2 в атомній, хімічній, авіаційній, суднобудівельній та інших галузях промисловості. Згідно ГОСТ 5632-72 в сталях даного класу передбачається присутність в структурі після охолодження на повітрі з високотемпературного стану крім мартенситу не менше 10 % фериту. Структурно вільний ферит виділяється у вигляді смуг.

Сталь 14X17H2 відрізняє:

- відмінна стійкість до підвищених температур (понад  $+500^{\circ}\text{C}$ ), причому при  $+400^{\circ}\text{C}$  ця сталь працює в звичайному режимі;
- видима ефективність роботи при коливаннях температури і її значному зниженні;
- підвищена стійкість до різного роду механічних впливів і пошкоджень;
- гарна стійкість до корозійного впливу і згубного впливу з боку агресивних середовищ (кислот, вологості і навіть лугів).

Дослідження проводили на кількох зразках зі сталі 14X17H2, хімічний склад та механічні властивості наведені в таблиці 3.1 і 3.2.

Структура металу сталі була визначена по діаграмі Шеффлера (Рисунок 3.1). Для визначення структури металу необхідно за відомим хімічним складом підрахувати еквіваленти хрому і нікелю і з відповідних точок на координатних осях провести прямі. Точка перетину прямих вказує на структуру металу.

Для реалізації розрахунку структурного класу сталі користуємось результатами хімічного аналізу зразків (Рисунок 3.1) [19].



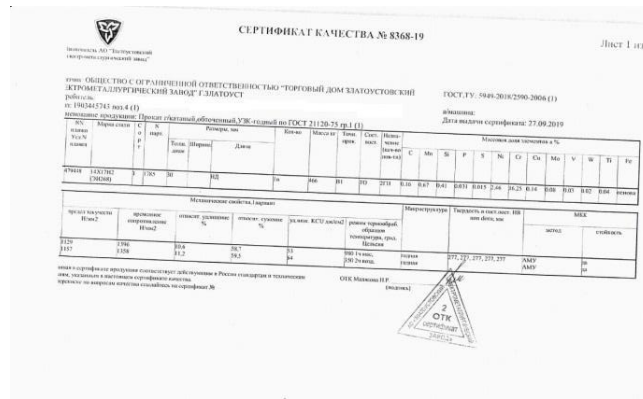


Рисунок 3.1 — Хімічний склад зразків сталі 14X17H2

Таблиця 3.3

Хімічний аналіз зразків сталі 14X17H2

Сталь, марка	Вміст елементів, % по масі									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	V	Mo	Cu
14X17H2	0,16	0,015	0,67	0,015	0,031	16,25	2,46	0,04	0,07	0,13

• Еквівалентна формула

$$Cr = (\% Cr) + 2 (\% Si) + 1,25 (\% Mo) + 5 (\% V) + 1,75 (\% Nb) + 0,75 (\% W) + 1,5 (\% Ti) = 16,25 + 2 \times 0,41 + 1,5 \times 0,08 + 5 \times 0,03 + 0,75 \times 0,02 + 1,5 \times 0,04 = 17,42 \quad (3.1)$$

$$Ni = (\% Ni) + (\% Co) + 0,5 (\% Mn) + 0,3 (\% Cu) + 30 (\% C) + 25 (\% N) = 2,46 + 0,5 \times 0,67 + 0,3 \times 0,14 + 30 \times 0,16 = 7,637 \quad (3.2)$$

Виходячи зі значень  $Ni_E$  і  $Cr_E$  – фериту. (3.3)

$$\Phi = 1,05 Cr_E + Ni_E - \sqrt{1,1 Cr_E^2 - 35,4 Cr_E + 45,7 Ni_E + 284} = 18,29 + 7,637 - \sqrt{1,1 \times 303,46 - 35,4 \times 17,42 + 45,7 \times 7,637 + 284} = 25,93 - 18,71 = 7,22\%$$

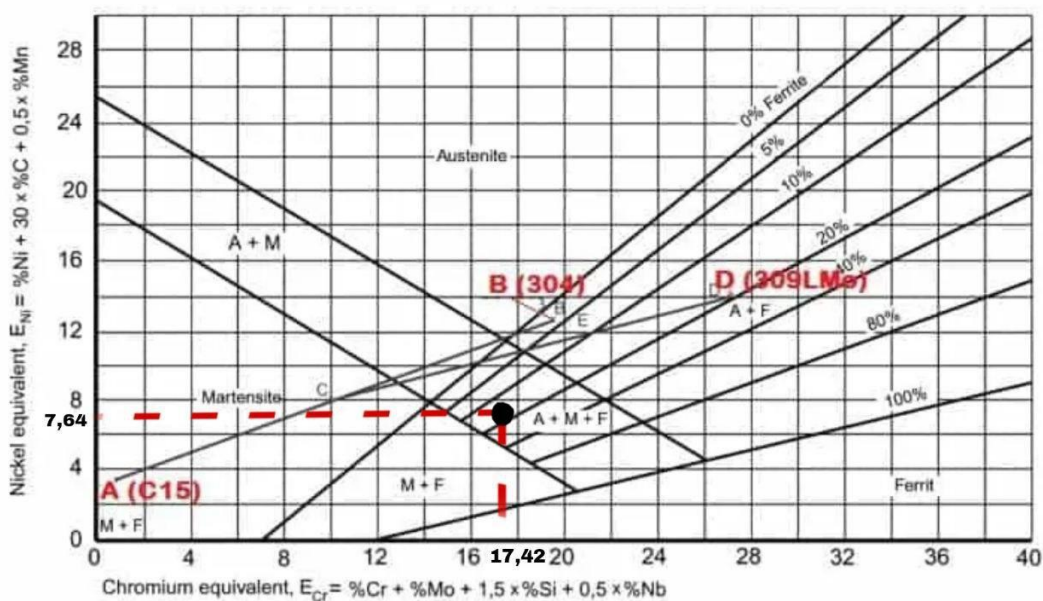


Рисунок 3.2 – Структура сталі 14X17H2 за діаграмою Шеффлера [33]

За результатами розрахунків було визначено, що сталь відноситься до мартенситно-феритного класу, де кількість  $\delta$ -фериту у сталі 14X17H2 дорівнює 7,22 % [20].

### 3.3 Мікроструктурний аналіз

Мікроструктурний аналіз – вивчення структури за допомогою світлових мікроскопів, які працюють у відбитому світлі [21]. Збільшення в 50...2000 разів дозволяє виявити елементи структури розміром до 0,2 мкм. При мікроструктурному аналізі досліджуються зразки – мікрошліфи з блискучою полірованою поверхнею, оскільки структура розглядається у відбитому світлі. При цьому спостерігаються мікротріщини та неметалеві включення [21].

Мікроскопічне дослідження передбачає виконання таких етапів:

- 1) Виготовлення мікрошліфа (одну із поверхонь зразка вирівнюють, шліфують і полірують для надання їй плоскої форми та дзеркального блиску;
- 2) Дослідження структури на полірованій (нетравленій) поверхні шліфа;

- 3) Виявлення структури полірованої поверхні травленням;
- 4) Металографічне дослідження структури протравленої поверхні шліфа.

Грубе шліфування зразків проводилося на шліфувальному верстаті для видалення грубих подряпин на поверхні шліфа. Шліфувальний верстат являє собою два металевих круга-диска, які приводяться в рух електричним двигуном. На дисках механічно закріплений абразивний папір, який послідовно замінювався на папір з меншим розміром зерна. Для тонкого шліфування на диски наклеювали тканину (фетр), яка добре утримує на собі частинки абразиву у вигляді спеціальної пасту «ГОИ». Її основою є оксид хрому з частинками розміром 1-4 мкм [22].

Хімічне травлення шліфів проводилося з метою збільшення оптичного контрасту між різними структурними складовими, вибіркоче забарвлення або розчинення фаз. У якості реактиву для хімічного травлення використали 3...5 %-ий розчин азотної кислоти в етиловому спирті; витримка – 30 с.

Візуальне вивчення і фотографування мікрошліфів поверхні зразків проводили на металографічних мікроскопах МІМ-8 в інтервалі збільшення 10...1000 разів. Для запобігання сколювання покриття в процесі виготовлення мікрошліфів зразки затискали в сталеві струбцини, поміщаючи між струбциною і зразком сталеві або мідні прокладки. Полірування шліфів проводили на полірувальних колах алмазною пастою зернистістю від 28 до 1 мкм, що забезпечувало одержання високої якості поверхні дослідження [22].

Для виявлення границь зерен захисних покриттів застосовували реактив Муракамі, що складається з  $1,0 \cdot 10^{-2}$  кг червоної кров'яної солі і  $1,0 \cdot 10^{-2}$  кг їдкою розжарюю на 0,1 кг води.

Вимір товщини захисних покриттів проводили за допомогою приладу ПМТ-3 при точність 0,3 мкм [23].

### 3.3. Випробування на макро- і мікротвердість

Найчастіше твердість визначають через вдавлювання в поверхню матеріалу стандартного тіла, яке зветься індентором (кулі, конуса, пірамідки); при застосуванні цього методу твердість характеризує здатність матеріалу опиратися місцевій пластичній деформації, тобто характеризує властивість матеріалу опиратися проникненню в нього цього стандартного тіла.

Матеріал, з якого виготовлено індентор, має твердість значно більшу ніж матеріал, твердість якого визначають, тому індентор вдавлюється в об'єкт дослідження, створюючи в ньому відбиток. За розміром відбитка судять про твердість матеріалу: чим твердіший матеріал, тим меншим буде розмір відбитка і навпаки [24].

#### 3.3.1 Методи визначення макротвердості

Основні методи визначення твердості вдавлюванням:

- за Брінеллем;
- за Роквеллом;
- за Віккерсом;

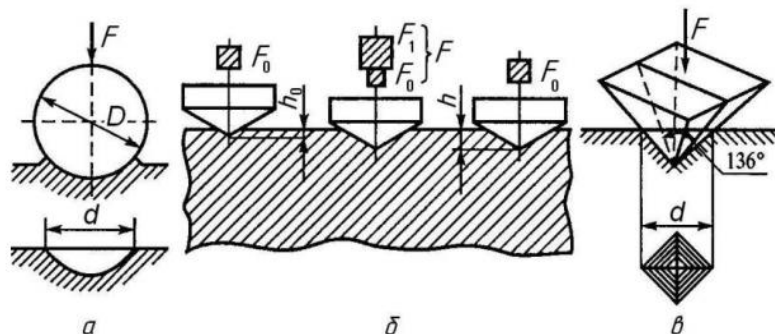


Рисунок 3.3 – Схема визначення твердості:

а – за Брінеллем; б – за Роквеллом; в – за Віккерсом і мікротвердості

## Твердість за Брінеллем

За методом Брінелля індентором, що вдавлюється в матеріал, є кулька з твердого сплаву, або сталева загартована кулька. Твердість за Брінеллем позначається числом твердості, за яким стоять літери *HBW* (якщо індентором є кулька з твердого сплаву) або *HB* (якщо індентором є загартована кулька), наприклад, 514HBW, або 514HB [25].

Розмірність в позначенні твердості не наводиться. Куля може мати діаметр  $D = 1; 2,5; 5; \text{ або } 10$  мм (кульку з  $D = 1$  мм застосовують дуже рідко). Зусилля випробування може становити 9,807 Н; 24,52 Н; 49,03 Н і т.д.; максимальне значення – 29,42 кН. Зусилля обирають таким чином, щоб діаметр відбитка  $d$  знаходився у межах  $0,24 \dots 0,6 D$ .

Очевидно, що одне й те саме навантаження  $F$  дає відбитки різного розміру від куль різного розміру, причому співвідношення діаметрів відбитків при одному й тому самому навантаженні дорівнює співвідношенню діаметрів куль-інденторів, до яких прикладається навантаження, тому, оскільки  $D_{10} = 2D_5 = 4D_{2,5} = 10D_1$ , то  $d_{10} = 2d_5 = 4d_{2,5} = 10d_1$ , що наочно ілюструє рисунок 3.4.

Метод Брінелля зручний у використанні, його застосування не потребує ретельної підготовки зразка, поверхня має бути гладкою та рівною без сторонніх речовин.

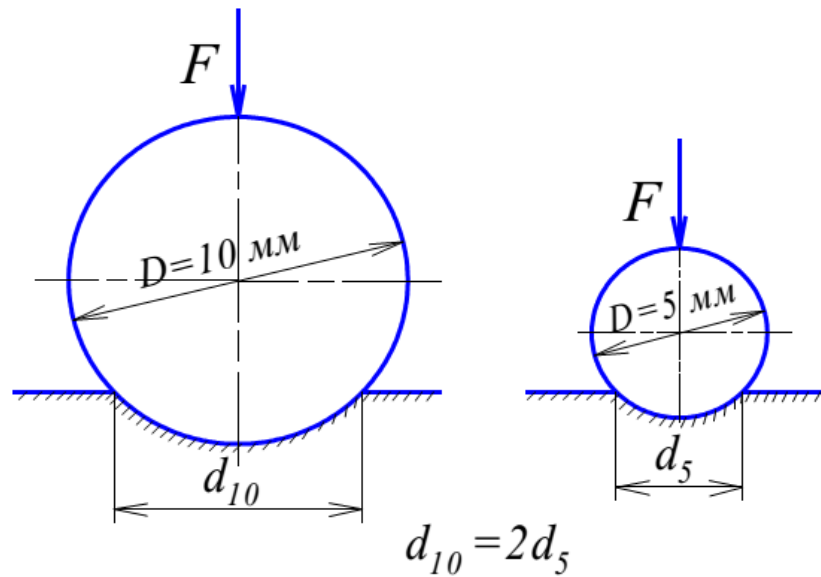


Рисунок 3.4 – Співвідношення діаметрів відбитків  $d_{10}$  і  $d_5$  від куль діаметрами  $D=10$  мм і  $D=5$  мм внаслідок дії навантаження  $F$

Крім того треба дотримуватися таких умов випробування твердості за Брінеллем: товщина зразка має бути, як мінімум, у 8 разів більше глибини відбитка; відстань від краю зразка до центру кожного відбитка має дорівнювати мінімум 2,5 значення середнього діаметра відбитка  $d$ ; відстань від двох сусідніх відбитків має дорівнювати, як мінімум, значенню трьох середніх діаметрів відбитка ( $3d$ ).

На практиці площу поверхні відбитка  $S$  і значення НВW (НВ) не розраховують, а значення твердості знаходять за спеціальною таблицею стандарта за діаметром відбитка  $d$ , який вимірюють за допомогою спеціального відлікового оптичного мікроскопа [26].

Послідовність вимірювання твердості за Брінеллем така: накінецьник 6 (Рисунок 3.5, а) з індентором-кулею 4 закріплюють у шпінделі. На предметному столику 2 розташовують зразок 1 зашліфованою поверхнею догори. Обертанням маховика 3 за годинниковою стрілкою предметний столик піднімають і притискають зразок до індентора-кулі 4

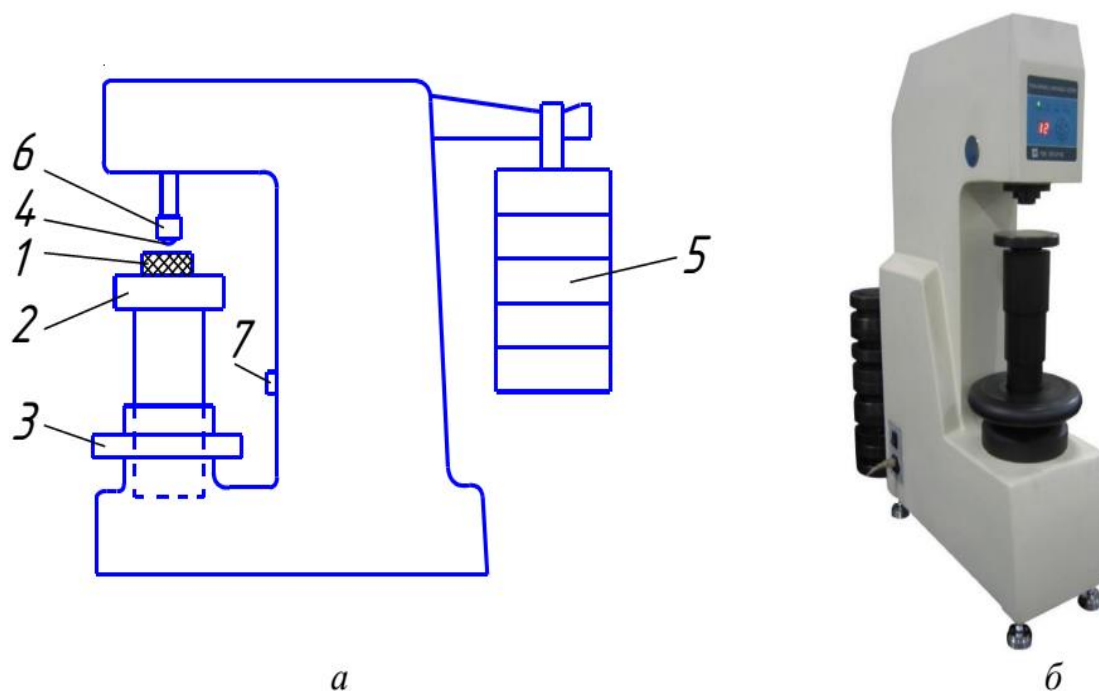


Рисунок 3.5 – Схема вимірювача твердості за Брінеллем (а) і загальний вигляд сучасного вимірювача твердості моделі ТН600 (б)

Обертання продовжують доти, доки не спрацює фіксатор, або до упору з обмежувачем. Натисканням кнопки 7 вмикають електродвигун, який через важільну систему, розташовану в пресі, забезпечує навантаження штоку, а через нього – вдавнення кулі внаслідок дії вантажу 5. Час від початку прикладання зусилля до досягнення повного значення зусилля має бути від 2 до 8 с. Навантаження діє 10-15 с, час дії вста-навлюється автоматично, залежно від твердості матеріалу, що випробовується. По закінченні дії вантажу електродвигун через ту саму важільну систему автоматично знімає навантаження зі штоку. Обертанням маховика проти годинникової стрілки предметний столик опускають і знімають зразок [27].

На зразку за допомогою вимірювального мікроскопа типа МПБ-2 (Рисунок 3.6, а) вимірюють діаметр відбитка. Мікроскоп складається з колонки 1, установочного кільця 2 і тубуса 3, в якому закріплені об'єктив 4 і окуляр 5 з вимірювальною шкалою (Рисунок 3.6, б). В основі мікроскопа є отвір 6. Мікроскоп

встановлюють основою на зразок з відбитком так, щоб відбиток було видно у цьому отворі. Відбиток візуально спостерігають в окулярі 5 мікроскопа. Окуляр можна обертати за допомогою окулярного кільця 2 для встановлення різкого зображення відбитка в окулярі. Окрім того різке зображення отримують і обертанням установочного кільця 3. Вимірюють діаметр відбитка (див. рисунок 3.6, б) у двох взаємно перпендикулярних напрямках і вираховують середнє арифметичне  $d$  з двох вимірювань [28].

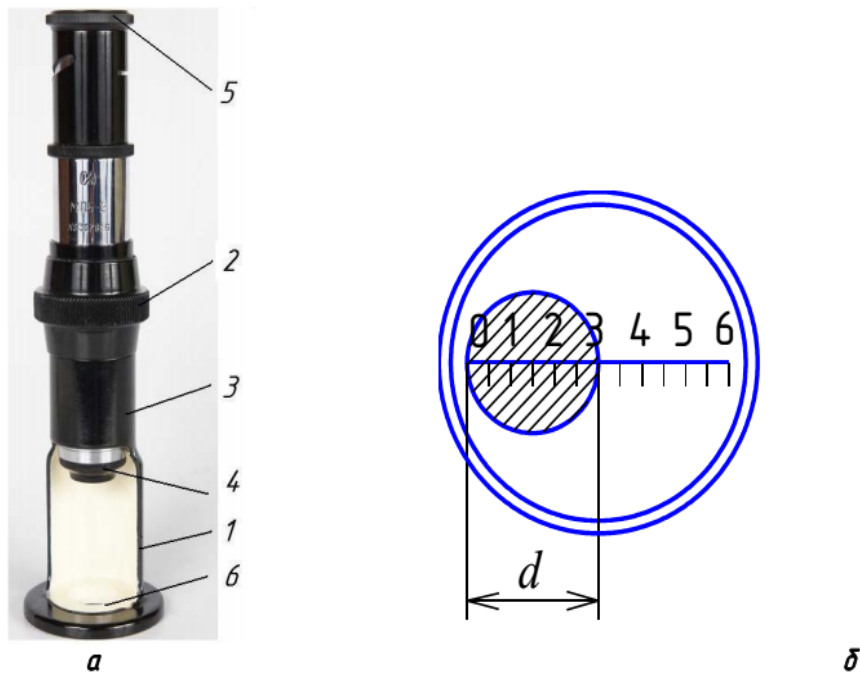


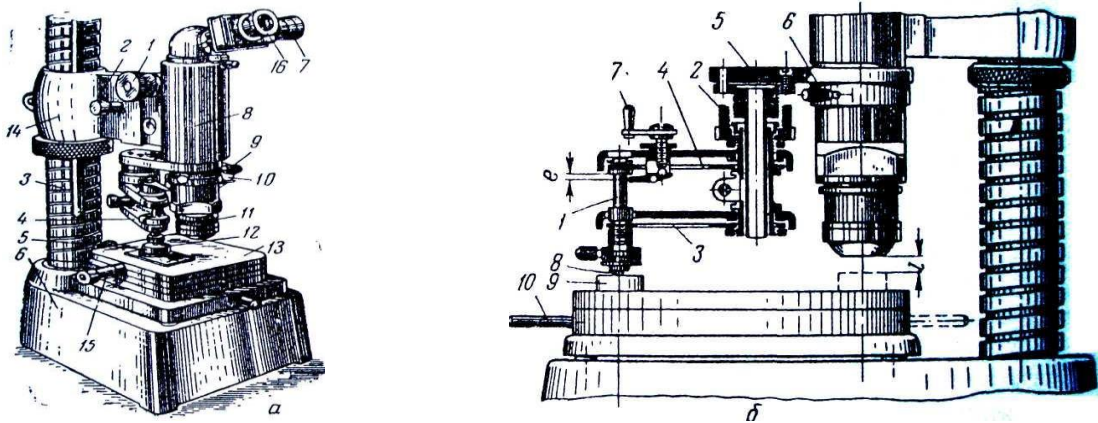
Рисунок 3.6 – Вигляд вимірювального мікроскопа МПБ-2 (а) і схема вимірювання діаметра відбитка  $d$  за допомогою вимірювальної шкали окуляра мікроскопа (б)

На рисунку 3, б наведено загальний вигляд сучасного цифрового вимірювача твердості моделі ТН600, на якому застосовують автоматичне завантаження випробувального зусилля діапазону від 1839 до 29420 Н і який забезпечує широкий діапазон вимірів (8...650 НВW).



### 3.3.2 Мікротвердість

Прилад ПМТ-3 працює за принципом вдавлювання. Наконечником (індентором) служить алмазна пірамідка із квадратною основою й кутом при вершині між протилежними гранями 136 град (метод Вікерса). Пірамідка вдавлювалася в зразок із навантаженням 0,5 Н, а час витримки під навантаженням 8 сек. Мікротвердість визначалася як середньоарифметичне значення для 30-40 одиничних вимірів діагоналей відбитків без видимих тріщин і сколів [29].



а - схема приладу: 1-макрогвинт; б - схема механізму навантаження: 1-шток; 2-микрогвинт; 3-стійка; 4- 2-гайка підйому навантаження; 3,4-пружні механізм навантаження; 5- пластини; 5-корпус; 6-центрувальний мікрошліф; 6-станина; 7- гвинт; 7-рукоятка; 8-алмазний наконечник; окулярний мікрометр; 8-тубус; 9- 9-мікрошліф; 10-ручка повороту гвинти центрування; 10- предметного столика освітлювач; 11-об'єктив; 12- алмазна пірамідка; 13-столик; 14- кронштейн; 15-мікромертичний гвинт предметного столика; 16- окуляр;

Рисунок 3.7 - Схема мікротвердоміра ПМТ-3

Методика випробування мікротвердості на приладі ПМТ-3:

1. Досліджуваний зразок 5 (мікрошліф) (Рисунок 3.7, а) закріпити на пластинці зі штифтами пластиліном. Строго паралельне положення поверхні шліфа стосовно площини предметного столика досягається вдавлюванням зразка в пластилін ручним пресом [30].

2. Помістити пластинку із закріпленим зразком на предметний столик 13 так, щоб зразок 5 перебував під об'єктивом 11. Гвинтами грубої й тонкої подачі 1,2 домогтися гарної видимості структурної складової, твердість якої вимірюють.

3. Після того як обране місце дослідження, зразок разом із предметним столиком перемістити так, щоб це місце виявилось в точці перетину перехрестя окулярного мікрометра (Рисунок 3.7).

4. Встановити на верхній шток 1 (Рисунок 3.7, б) алмазного наконечника вантаж, рівний 150г.

5. За допомогою ручки 10 предметний столик повернути приблизно на 180 град. (від одного упору до іншого).

6. Повільним поворотом рукоятки 7 (Рисунок 3.7, б) від упору до упору опустити індентор 8, що під дією встановленого вантажу вдавлюється у випробувану поверхню й залишає відбиток приблизно квадратної форми (Рисунок 3.8), діагональ якого залежить від твердості випробуваної структурної складової. Витримка під навантаженням повинна становити 10-15 сек [31].

Після закінчення витримки індентор підняти поворотом рукоятки 7 до вихідного положення. У противному випадку при повороті предметного столика 13 можна зламати алмазний наконечник 8 і подряпати шліф 9.

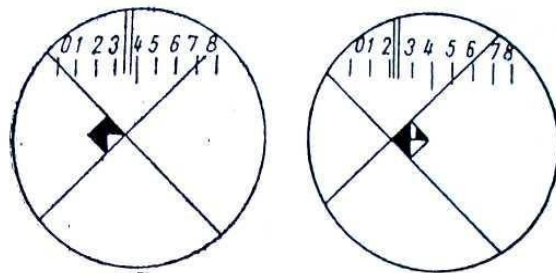


Рисунок 3.8 – Схема встановлення відбитків

7. Перемістити предметний столик 13 зі зразком 9 у вихідне положення; завдяки такому переміщенню шліф 9 на якому зроблений відбиток, встановлюють під об'єктив 11 у поле зору мікроскопа.

8. Пересуванням предметного столика 13 мікрогвинтами 15 і пересуванням перехрестя, видимого в окулярі 16 за допомогою вимірювального барабана окулярного мікрометра 7 (Рисунок 3.7, а), встановити відбиток відносно перехрестя так, як це показано на рисунку 3.7 (положення 1), потім обертанням вимірювального барабана перемістити перехрестя в нове положення (Рисунок 3.7, положення 2) і записати значення.

9. Визначити величину діагоналі відбитка за таблицею [32].

### **3.4 Висновки**

Сталь 14X17H2 має широке застосування в атомній, хімічній, авіаційній, суднобудівельній та інших галузях промисловості через свою відмінну стійкість до підвищених температур, коливань температури, механічних впливів та корозійного впливу.

Ця сталь містить мартенсит і ферит, що забезпечує його стійкість та допомагає у підвищенні механічних властивостей.

Визначення структури металу здійснено на основі діаграми Шеффлера, що є важливим інструментом для аналізу хімічного складу і властивостей сталі.

Використовуючи метод вдавлювання стандартного тіла (індентора) у матеріал, визначено твердість сталі 14X17H2.

Випробування твердості за Брінеллем дозволило зробити висновки про твердість сталі на основі глибини і діаметра відбитка, що виходить в результаті вдавлювання індентора в матеріал.

Було використано сучасне обладнання, таке як вимірювальний мікроскоп і цифровий вимірювач твердості, для точного вимірювання і визначення твердості сталі.

Отже, на основі аналізу хімічного складу, структурних особливостей та механічних властивостей сталі 14X17H2, можна зробити висновок про її високу

стійкість до різноманітних умов експлуатації, що робить її ідеальним матеріалом для використання в різних галузях промисловості.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА МАРШРУТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

#### 4.1 Розробка маршрутної технології виготовлення деталі

Розробка маршрутної технології виготовлення частини дозуючої голки передбачає оптимізацію виробничих процесів для забезпечення ефективного виробництва та високоякісної кінцевої продукції. У цьому розділі описано етапи виробництва, а також обладнання та інструменти, які використовуються для кожного етапу[33].

Наведена таблиця з операціями для виготовлення деталі (Таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 — Маршрутна технологія виготовлення деталі голка дозуюча

№ Операції	Операція	Назва процесів	Дільниця, основне обладнання	Допоміжне обладнання
Фаза 1. Технологічний процес отримання сталі				
1.1	Добування ресурсів та необхідних матеріалів	Процес видобутку та збагачення залізної руди	Рудники / шахти	-
		Добування вугілля	Рудники / шахти Виробничий комплекс для виготовлення коксову	-
		Видобуток пального газу, його підготовка	Газовидобувна інфраструктура	-
1.2	Отримання чавуну	Підготовки шихти	Шихтовий двір	Магніто-грейферні крани
		Нагрівання паливної суміші	Цех електропостачання	Регенеративні теплообмінники
		Відновлення заліза, створення чавуну і шлаку	Металургійний цех	Доменна піч
		Вирівнювання хімічного складу чавуну	Відділення міксування	Змішувачі
1.3	Отримання сталі	Висипання твердих	Конвертерна піч	Ливарні форми

		шихтових матеріалів до конвертеру, вливання рідкого чавуну		
		Впровадження стисненого кисню в розплав, додавання флюсу	Конверторна піч	Фурма
		Переливання сталі і шлаку. Отримання литого виробу	Конверторна піч	Ковші шлаковози, виливниці
		Наповнення електродугової печі твердими шихтовими матеріалами та скрапом	Електродугова піч	Мульди, ковші
		Використання електричної дуги, введення флюсів та відновлення сталі	Електродугова піч	Завальні машини
		Виливання сталі в розливочний ківш	Плаவில்не відділення	Механізм нахилу електродугової печі, розливочний ківш, мостовий кран
Фаза 2. Отримання заготовки				
2.1	Отримання заготовки	Трикатна ковка	Кувальний прес	Бойок
2.2	Чорнова термообробка	Ізотермічний відпал	Шахтна піч СШЗ-6.6/10	-
Фаза 3. Чорнова механічна обробка				
3.1	Токарна обробка	Первинна токарна обробка зовнішніх і внутрішніх деталей	Токарний верстат	-
		Формування шпонкової канавки методом розтягування	Напрямний кондуктор	Шпонкова протяжка

## Продовження таблиці 4.1

Фаза 4. Термічна обробка				
4.1	Попередня термічна обробка	Відпал	Камерна електропіч СНО-5.8.3/11	
4.2	Зміцнююча термічна обробка	Гартування	Трубчаста електропіч СУОЛ-0,5.11/12,5	
4.3	Остаточна термічна обробка	Відпуск	Електрична піч СНО-6.6.6/7	
Фаза 5. Хіміко-термічна обробка				
5.1	Хіміко-термічна обробка	Ціанування	Електрична піч	

## 4.2 Висновки

В ході розробки маршрутної технології були розглянуті всі необхідні етапи виробництва, включаючи підготовчий етап, механічну обробку, термічну обробку та обробку поверхні. Кожен етап був оптимізований з використанням відповідного обладнання та інструментів, які дозволяють досягти високої ефективності та якості виробництва.

Результатом розробки маршрутної технології є можливість виготовляти дозуючу голку з необхідними геометричними параметрами, відповідно до технічних вимог. Технологічні процеси, включаючи термічну обробку, допомагають покращити механічні властивості та структуру матеріалу, забезпечуючи високу міцність, жорсткість та довговічність дозуючої голки.

У результаті використання розробленої маршрутної технології можна досягти оптимального виробництва дозуючих голок з високою якістю, що впливає на безпеку та надійність їх функціонування в паливних системах. Такий підхід дозволяє досягти високої ефективності та задоволення вимог замовника.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНКОВО – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 5.1 Термічна обробка деталі

Вибір конкретних параметрів термічної обробки, таких як температура і тривалість відпалу, температура гартування, а також температура і час відпуску, ґрунтується на поєднанні емпіричних знань, попереднього досвіду та експериментальних досліджень. Важливо відзначити, що ці параметри можуть змінюватися в залежності від конкретних вимог до дозуючої голки і бажаних властивостей [34].

Вибір і обґрунтування процесу термічної обробки мають вирішальне значення для забезпечення бажаних властивостей і експлуатаційних характеристик деталі.

Процес термічної обробки дозуючої голки, виготовленої зі сталі 14X17H2, включає в себе: відпал, гартування, відпуск та ціанування.

Етап попередньої термічної обробки голки дозуючої виправляє дефектну структуру деталі після попередньої обробки (Рисунок 5.1,а) та готує виріб до подальших процесів, знімаючи внутрішні напруги, покращуючи оброблюваність і вдосконалюючи мікроструктуру матеріалу.

##### 1) Відпал:

Відпал здійснюється при температурі 800°C впродовж 5 годин. Процес відпалу допомагає зняти внутрішню напругу і сприяє формуванню мікроструктури, однорідної за хімічним складом, розмірами і формою (Рисунок 5.1,б). Після відпалу твердість дозуючої голки була визначена на рівні 255 НВ [35].



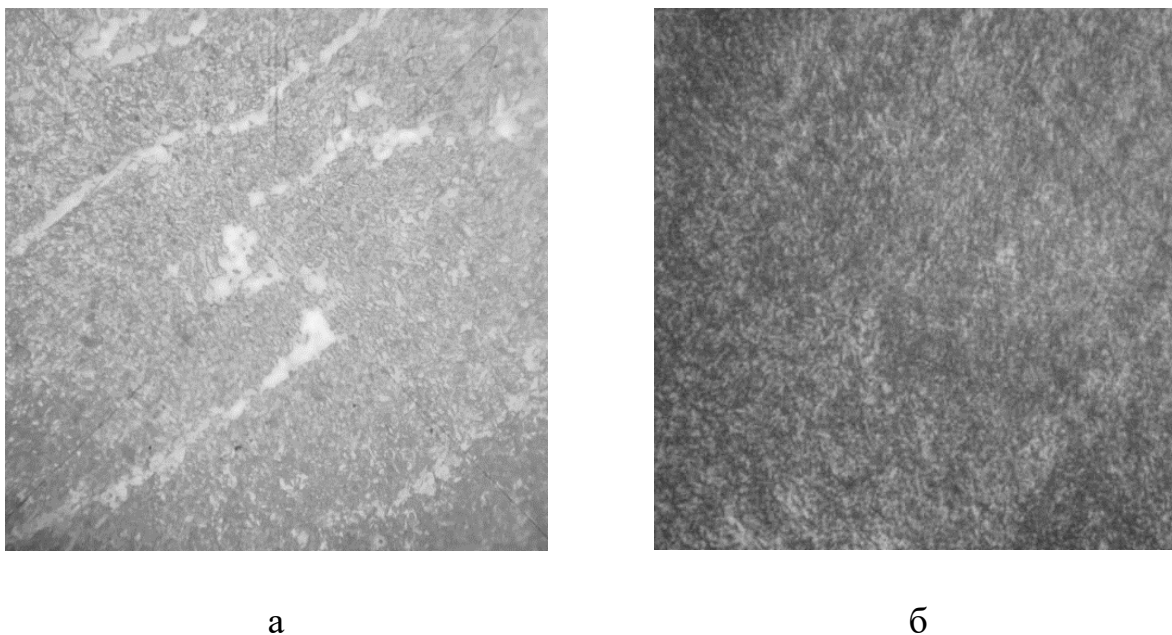


Рисунок 5.1 — Структура сталі 14X17H2: а – після прокатування, б – після відпалу, x100

2) Гартування при 1020-1050°C (час витримки 30 хвилин):

Гартування - це процес швидкого охолодження, який слідує за етапом нагрівання. Дозуюча голка нагрівається до діапазону температур 1020-1050°C, а потім швидко охолоджується шляхом занурення в гартівне середовище — масло. Цей процес дозволяє отримати бажану структуру.

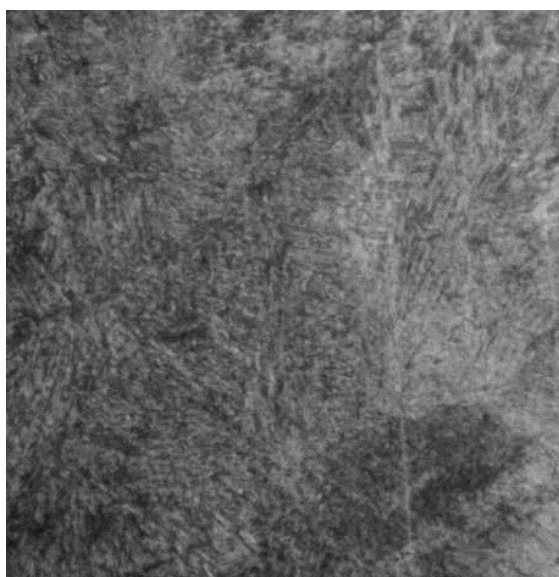


Рисунок 5.2 — Структура сталі 14X17H2 після гартування, x500

Мартенсит гартування — це високотверда структура. Крім того, в загальне значення твердості сталі 14X17H2 після гартування зробили свій внесок карбіди:  $Cr_{23}C_6$  та  $Cr_7C_3$ . Дещо зменшує загальну твердість, після гартування, структура фериту, яка залишається після зміцнення [36].

Твердість сталі 14X17H2 після гартування становить 61-63 HRC.

3) Відпуск при 600°C (час витримки 2 години):

Відпуск є наступним процесом після гартування. Загартовану дозуючу голку нагрівають до температури 600°C і витримують при цій температурі протягом 2 годин. Відпуск зменшує крихкість матеріалу і підвищує його в'язкість, зменшуючи при цьому твердість. Цей етап забезпечує оптимальний баланс між твердістю і в'язкістю, що сприяє підвищенню загальної продуктивності дозуючої голки.

Структура сталі 14X17H2 після термополіпшення — сорбід відпуску (Рисунок 5.3).

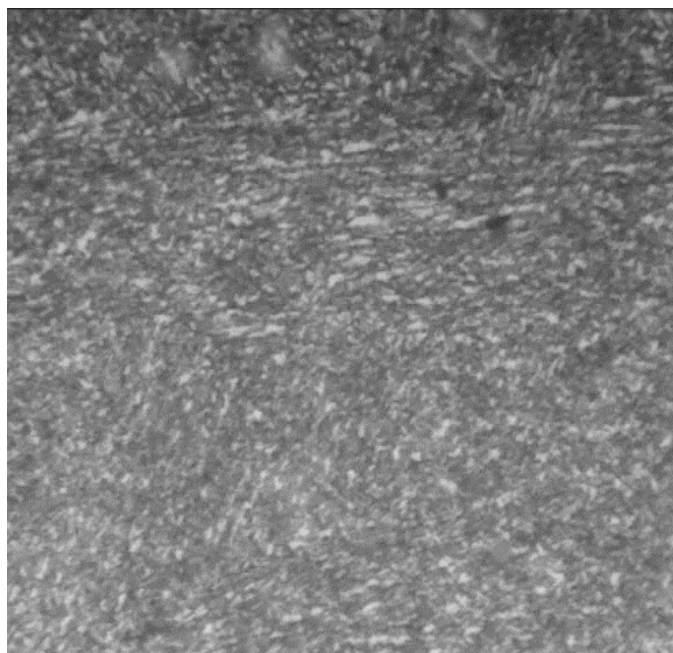


Рисунок. 5.3 — Структура сталі 14X17H2 після термополіпшення, x500

Після повної термічної обробки твердість дозуючої голки була виміряна в діапазоні 27 - 31 HRC.

При використанні цього процесу термообробки дозуюча голка проходить серію контрольованих термічних обробок, в результаті чого досягається бажана мікроструктура і механічні властивості. Етап попередньої термічної обробки, що включає відпал, гартування і відпуск, створює міцну основу для подальшої остаточної термічної обробки і забезпечує оптимальну продуктивність дозуючої голки [37].

## **5.2 Хіміко-термічна обробка деталі «голка дозуюча»**

Як частина процесу остаточної термічної обробки дозуючої голки, виготовленої зі сталі 14X17H2 (Рисунок 5.4), застосовується ціанування. Ціанування - це метод обробки поверхні, який полягає в насиченні поверхні виробу вуглецем і азотом, в результаті чого утворюється зміцнене поверхнєве покриття високої твердості, зносості та корозійної стійкості [38].

Процес ціанування здійснюється в розплаві солей (КСНО 65-75% и 25-35% К<sub>2</sub> СО<sub>3</sub>) (поташ) при температурі 580-600°С, з витримкою 3 години.

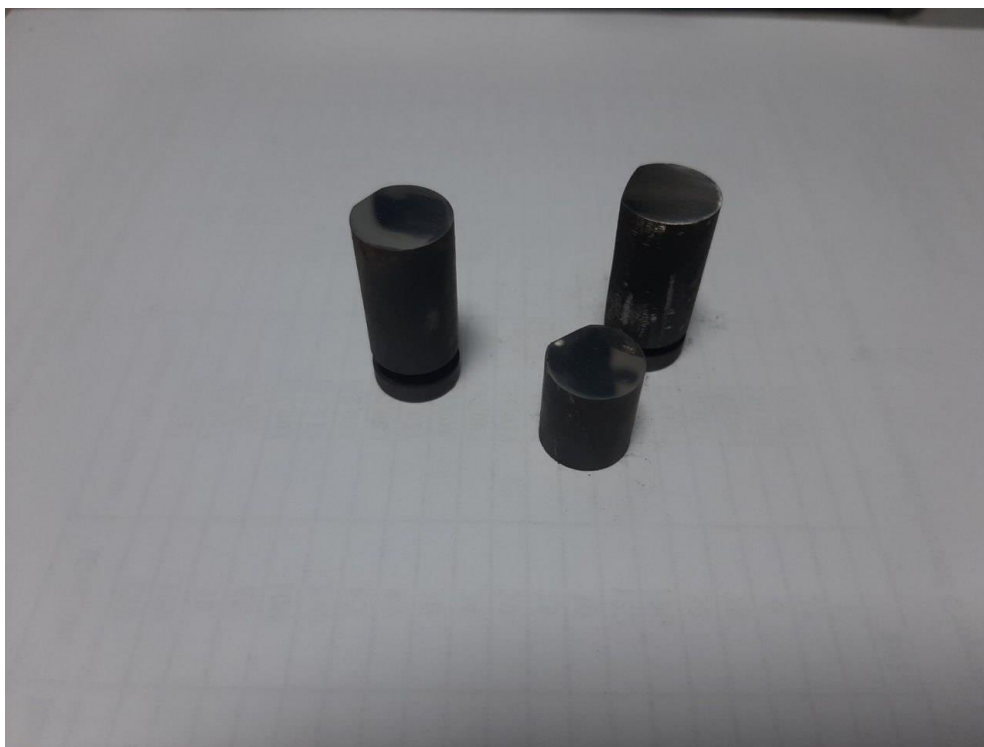


Рисунок 5.4 — Зразки сталі 14X17H2 після ХТО

Під час ціанування (Рисунок 5.5) дозуюча голка поміщається в контрольовану атмосферу, яка містить багату на вуглець сполуку, таку як метан або пропан, разом з джерелом азоту, наприклад, аміаком або газоподібним азотом. Дозуюча голка нагрівається до заданої температури і витримується при цій температурі протягом заданого часу [39].

Атоми вуглецю та азоту дифундують на поверхню дозуючої голки, утворюючи тверді сполуки, такі як карбіди, нітриди та карбонітриди. Цей процес дифузії створює зміцнене покриття, в той час як серцевина деталі залишається відносно непошкодженою. Глибину покриття можна контролювати, регулюючи параметри процесу, включаючи температуру і час витримки.

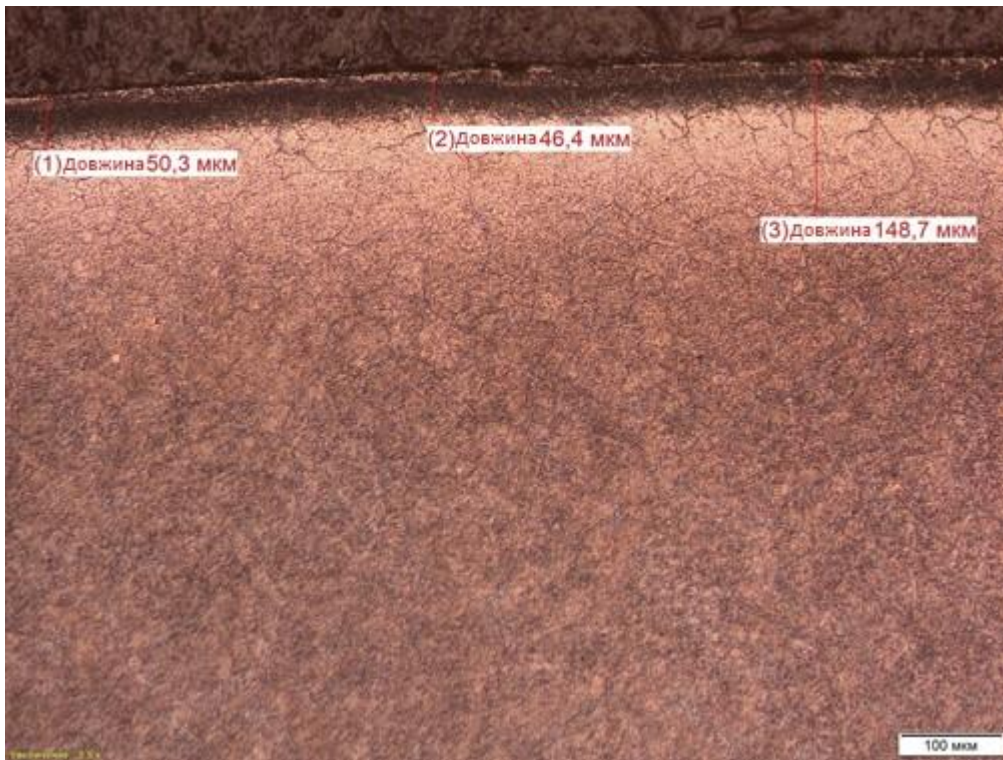


Рисунок 5.5 — Структура сталі 14X17H2 після ціанування

В результаті ціанування на поверхні деталей формується зміцнений шар, що складається з декількох зон. Оксидна фаза типу  $Fe_3O_4$  формує верхній шар товщиною до 5 мкм, під яким знаходиться  $\epsilon$ -фаза типу  $Fe_{2-3}(N, C)$  товщиною до 15 мкм. Наступним шаром є зона  $\gamma'$ -фази типу  $Fe_4(N, C)$  з товщиною до 1 мкм [40]. Під ціанованим шаром розміщена дифузійна зона, яка простягається до 0,4 мм і яка містить твердий розчин вуглецю та азоту в залізі.

Мікротвердість даної поверхні дорівнює 13 ГПа.

Ціанування пропонує кілька переваг для дозуючої голки, виготовленої зі сталі 14X17H2. Воно покращує поверхневу твердість, зносостійкість і втомну міцність деталі, роблячи її більш довговічною і придатною для складних застосувань. Крім того, загартований корпус забезпечує посилений захист від корозії і підвищує загальну продуктивність і термін служби дозуючої голки.

Для забезпечення ефективності процесу ціанування і перевірки якості

обробленої дозуючої голки застосовуватися різні методи аналізу:

1. **Мікроструктурний аналіз:** Мікроструктуру ціанованного шару дослідили за допомогою металографічних методів. Цей аналіз допомагає оцінити глибину і однорідність загартованого шару і гарантує, що він відповідає заданим вимогам [38].

2. **Вимірювання твердості:** Вимірювання твердості проводилася за допомогою таких методів, як випробування на твердість по Роквеллу або по Віккерсу [41]. Ці випробування оцінюють твердість поверхні дозуючої голки і дають уявлення про ефективність процесу ціанування.

3. **Випробування на зносостійкість:** Ціанована дозуюча голка може пройти випробування на зносостійкість, наприклад, випробування на абразивний знос або випробування "штифт на диску". Ці випробування імітують умови експлуатації деталі і оцінюють її здатність протистояти зносу і тертю.

Завдяки застосуванню процесу ціанування та ретельним методам контролю дозуюча голка зі сталі 14X17H2 може досягти покращених властивостей поверхні, підвищеної зносостійкості та довговічності, що забезпечує її придатність для використання у передбачуваних сферах застосування [41].

В цілому, заключний етап термічної обробки, включаючи процес ціанування і подальші методи контролю, відіграє вирішальну роль в оптимізації продуктивності і продовженні терміну служби дозуючої голки.

### **5.3 Основне обладнання термічної обробки**

#### **1) Відпал:**

В якості обладнання для проведення відпалу була обрана камерна електропіч СНО-5.8.3/11 (Рис 5.6). Її основні характеристики наведені в таблиці 5.1.



Рисунок 5.6 — Камерна електропеч СНО-5.8.3/11

Таблиця 5.1

## Характеристики камерної електропечі СНО-5.8.3/11

№	Назва технічної характеристики	Значення
1	Номінальна потужність, кВт	24
2	Параметри електроживлення	3×380 В, 50 Гц
3	Максимальна температура в робочому просторі, °С	1100
4	Діапазон автоматичного регулювання температури, °С	40...1100
5	Розміри робочого простору, ширина × довжина × висота, мм	500 × 800 × 300
6	Стабільність регулювання температури в усталеному тепловому режимі, без садки, °С	± 5
7	Габаритні розміри, мм,	ширина×довжина×висота 1500 × 1550 × 1650
8	Розрахункова маса печі, кг	1200

Технічний опис: Електропеч СНО-5.8.3/11 призначена для стаціонарної термообробки різних матеріалів. Вона оснащена системою автоматичного регулювання температури, яка використовує надійні твердотільні безконтактні

реле і мікропроцесорний терморегулятор. Цей терморегулятор встановлює і контролює температуру, час досягнення необхідного режиму і час утримання на цьому режимі. Терморегулятор має можливість під'єднання до комп'ютера через інтерфейс і програмне забезпечення, що додається [42].

У печі також встановлено систему безпеки, яка активується в разі перегріву печі або її електронних блоків, і вимикає нагрівачі в разі відчинення дверцят. Вона облицьована сучасними енергоощадними матеріалами, такими як волокнисті, мікропористі, вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали. Це забезпечує швидке досягнення заданої температури та знижує енергоспоживання. Нагрівачі, що складаються зі спіралей із суперфехралу, розміщені на трубках, закріплених у пазах спеціальних кронштейнів із вогнетривкої кераміки [43]. Це забезпечує надійну роботу і легку заміну нагрівачів за потреби. Подові нагрівачі закриті керамічними плитками.

Піч оснащена припливними вентиляційними отворами в дверях і витяжними отворами у верхній частині печі. Вони призначені для видалення можливих газових виділень під час термообробки та прискорення процесу охолодження печі за потреби [41].

Отже, дана піч підходить до даної деталі.

## **2) Гартування:**

У якості обладнання для гартування сталі 14X17H2 було застосовано трубчасту електропіч СУОЛ-0,5.11/12,5 (Рисунок 5.7). Характеристики трубчатої електропечі СНО-5.8.3/11 були наведені в таблиці 5.2.





Рисунок 5.7 — Трубчаста електропіч СУОЛ-0,5.11/12,5

Таблиця 5.2

Характеристики трубчастої електропечі СУОЛ-0,5.11/12,5

№	Назва технічної характеристики	Значення
1	Номінальна потужність, кВт	4,5
2	Параметри електроживлення	220 В, 50 Гц
3	Максимальна температура в робочому просторі, °С	1250
4	Діапазон автоматичного регулювання температури, °С	40...1250
5	Розміри робочого простору, мм (діаметр×висота)	50 × 1100
6	Габаритні розміри, мм, не більше (діаметр × висота)	550 × 1300 × 550
7	Стабільність підтримання температури в усталеному тепловому режимі без садки, °С	не гірше ± 3
8	Тип терморегулятора / Тип термопари	ТРП-08 ТП
9	Матеріал нагрівачів	Фехраль
10	Середовище в робочому просторі Повітря	Повітря

Лабораторна трубчаста електропід СУОЛ-0,5.11/12,5 оснащена системою автоматичного контролю температури, яка використовує твердотільне безконтактне реле і мікропроцесорний регулятор температури. Цей регулятор встановлює задану температуру, час досягнення заданої температури і тривалість витримки за вказаної температури. Пульт керування розташований у нижній частині передньої панелі печі [34].

Під облицьована сучасними вогнетривкими, теплоізоляційними, волокнистими і мікропористими матеріалами. Керамічна трубка встановлена горизонтально і закрита з двох боків знімними пробками [42].

### 3) Високий відпуск:

Для високого відпуску було використано електричну під СНО-6.6.6/7 (Рисунок 5.8).

Характеристики електричної печі СНО-6.6.6/7 зазначені в таблиці 5.3.

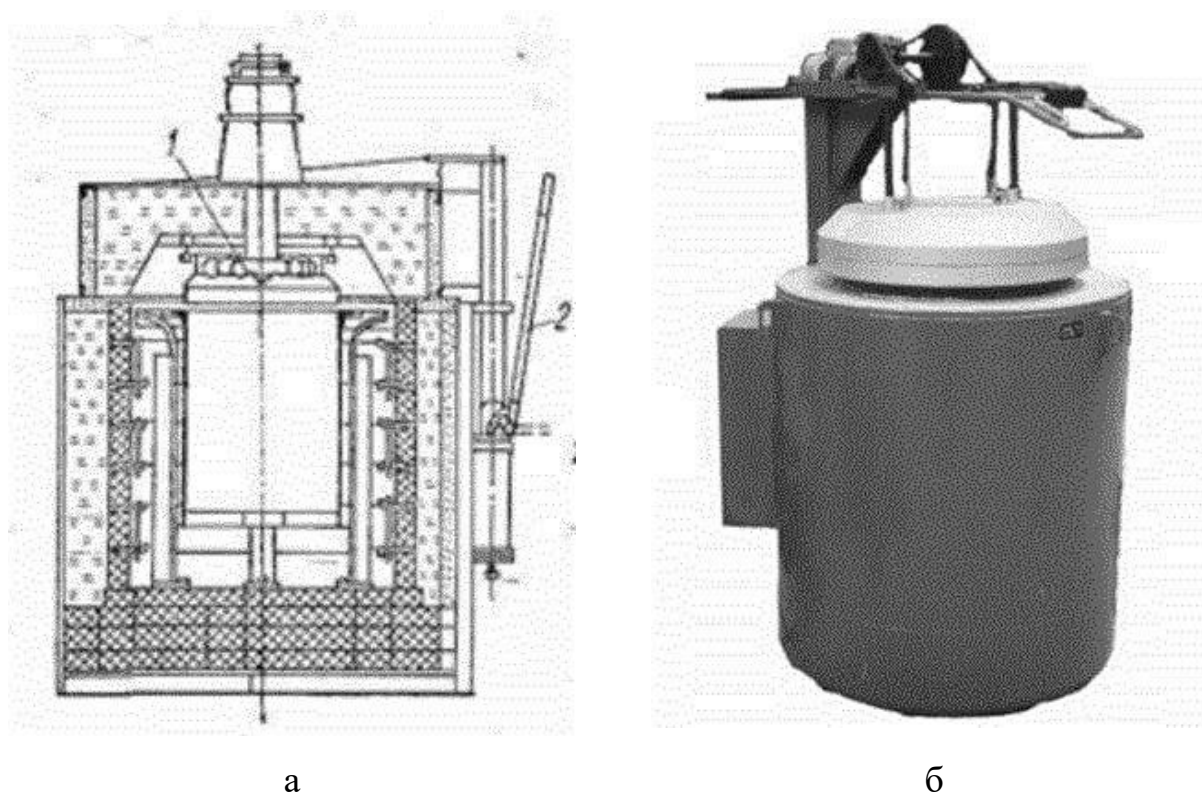


Рисунок 5.7 – Схема (а) та загальний вигляд (б) низькотемпературної шахтної електропечі СНО-6.12/7

Таблиця 5.3

## Характеристики електричної печі СНО-6.6.6/7

№	Назва технічної характеристики	Значення
1	Встановлена потужність загальна, кВт	15
2	Встановлена потужність нагріву, кВт	12
3	Напруга мережі живлення, В	380
4	Частота змінного струму, Гц	50
5	Число фаз	3
6	Діапазон автоматичного регулювання температури, °С	40...700
7	Час розігріву електропечі до номінальної температури без садки, не більше, хв	60
8	Стабільність температури у сталому тепловому режимі* в точці вимірювання, без садка, не гірше, °С	± 5
9	Середовище у робочому просторі	Повітря
10	Розміри робочої камери, щонайменше: ширина x довжина x висота, мм	600x600x600
11	Габаритні розміри, не більше: ширина x довжина x висота, мм	1600x1300x1950
12	Маса, не більше, кг	750

- СНО – електрична піч призначена для прокалювання зварювальних матеріалів, флюсів, спецелектродів; високої відпустки, відпалу.
- Піч виготовлена з вбудованою системою автоматичної підтримки температури в робочій камері.
- Передбачено систему сигнальної індикації за роботою печі та візуальний контроль поточної температури у камері.
- Як нагрівачі використовуються сплави високого опору, розташовані в

трьох площинах, для рівномірності теплового полів.

- Може бути встановлена система примусового перемішування повітря вентилятором.
- У печі передбачено швидку заміну нагрівачів, рукав для підключення до системи вентиляції.
- Електропечі цього ряду можуть поставлятися з муфелем із жароміцної сталі.

#### **5.4 Висновки**

В ході роботи було обрано термічну обробку деталі. Завданням попередньої термічної обробки є: поліпшення оброблюваності металу для виготовлення виробів; підготовка структури металу для остаточної термічної обробки, отримання однорідної дрібнозернистої структури; зняття наклепу, зниження рівня внутрішніх напруг; поліпшення комплексу механічних властивостей.

Термічна обробка деталі «голка дозуюча» складається з комплексу операцій: відпал ( $800^{\circ}\text{C}$ ), гартування  $1020\text{-}1050^{\circ}\text{C}$  (протягом 30 хвилин) з охолодженням в маслі, високий відпуск ( $600^{\circ}\text{C}$ ) 2 години з наступним охолодженням на повітрі. Кінцевою операцією було ціанування.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було реалізовано дослідження та розробку термічних та хіміко-термічних обробок для деталі “дозуюча голка” зі сталі 14X17H2. Робота складалася з п'яти загальних розділів: Характеристика та умови експлуатації деталі, Огляд літератури, Вибір матеріалу та методів дослідження, Розробка маршрутної технології виготовлення деталі, Розрахунково-експериментальна частина.

У розділі "Характеристика та умови експлуатації деталі" були проаналізовані умови роботи та призначення деталі, встановлені основні вимоги до готового виробу, такі як підвищена зносостійкість, втомна міцність при контактному навантаженні та твердість.

У розділі "Огляд літератури" проведено критичний аналіз літературних джерел та визначено оптимальний сучасний метод насичення поверхні виробу - низькотемпературна ціанізація. Були описані принцип обробки, технологія та переваги цього методу.

У розділі "Вибір матеріалу та методів дослідження" проведено аналіз матеріалів для деталі та запропоновано виготовляти її зі сталі 14X17H2, обґрунтовано вибір цього матеріалу з економічної точки зору.

У розділі "Розробка маршрутної технології виготовлення деталі" розроблена карта маршрутної технології виготовлення деталі, включаючи отримання сталі, отримання заготовки, чорнову механічну обробку, остаточну термічну обробку, чистову механічну обробку, хіміко-термічну обробку та вихідний контроль.

У розділі "Розрахунково-експериментальна частина" запропонована сучасна технологія термічної обробки деталі, включаючи гартування при 1210-1230 °С, відпуску та нинизькотемпературної ціанізації при температурі 540-560 °С. Було встановлено, що в результаті термічної обробки формується структура

мартенситу відпуску, карбіди та аустеніт залишковий. Описано формування захисного покриття на поверхні деталі, його склад та властивості, зокрема твердість основи та поверхневого шару.

Загальні результати роботи показали, що розроблені термічні та хіміко-термічні обробки повністю задовольняють вимогам, які висуваються до готового виробу.

Також було обране обладнання, необхідне для вимірювання твердості та обладнання термічної та хіміко-термічної операції.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Llewellyn D. T., Hudd R. C. Stainless steels. *Steels*. 1998. С. 291–379. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-075063757-2/50004-4> (дата звернення: 04.06.2023).
2. Steel E. S. Republic Steel Corporation. Hassell Street Press, 2021. 26 с.
3. Прокопович, Ігор Валентинович *Металознавство : навчальний посібник* / І. В. Прокопович. – Одеса : Екологія, 2020. – 308 с.
4. Холявко В. В. *Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів [текст]: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання* / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. 156 с.
5. Corrosion Test of Stainless Steel (2). DENKI-SEIKO[ELECTRIC FURNACE STEEL]. 1964. Т. 35, № 4. С. 192–195. URL: <https://doi.org/10.4262/denkiseiko.35.192> (дата звернення: 04.06.2023).
6. Influence of physicochemical properties on the hygienic status of stainless steel with various finishes / C. Faille та ін. *Biofouling*. 2000. Т. 15, № 4. с. 261–274. URL: <https://doi.org/10.1080/08927010009386317> (дата звернення: 04.06.2023).
7. Recyclability of stainless steel (316 L) powder within the additive manufacturing process / N. E. Gorji та ін. *Materialia*. 2019. Т. 8. С. 100489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100489> (дата звернення: 06.06.2023).
8. Methods and materials for the identification of stainless steel: Baker I. *Stainless Steel. Fifty Materials That Make the World*. Cham, 2018. С. 223–228. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78766-4\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78766-4_42) (дата звернення: 08.06.2023).
9. Amann T., Waidele M., Kailer A. Analysis of mechanical and chemical mechanisms on cavitation erosion-corrosion of steels in salt water using electrochemical methods. *Tribology International*. 2018. Т. 124. С. 238–246.

- URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.012> (дата звернення: 09.06.2023).
10. Determination of Directional Residual Stresses by the Contour Method / J. Hodek та ін. *Metals*. 2019. Т. 9, № 10. С. 1104. URL: <https://doi.org/10.3390/met9101104> (дата звернення: 09.06.2023).
11. Terylo N., Huang X., Patnaik P. C. Laser-Based Additive Manufacturing Technologies for Aerospace Applications. *Advanced Engineering Materials*. 2019. Т. 21, № 11. С. 1900617. URL: <https://doi.org/10.1002/adem.201900617> (дата звернення: 10.06.2023).
12. Grünwald S. Reproducible Dispensing of Liquids in the Nanolitre Range. *ADHESION ADHESIVES&SEALANTS*. 2018. Т. 15, № 1. С. 28–31. URL: <https://doi.org/10.1007/s35784-018-0002-z> (дата звернення: 12.06.2023).
13. Hybrid laser-microplasma welding of stainless steels / I. V. Krivtsun та ін. *Avtomatičeskaâ svarka (Kiev)*. 2019. Т. 2019, № 12. С. 33–40. URL: <https://doi.org/10.15407/as2019.12.04> (дата звернення: 13.06.2023).
14. Вплив легуючих елементів на корозію нержавіючих сталей в озонуємом середовищі : thesis / Г. О. Татарченко та ін. 2017. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/66700> (дата звернення: 14.06.2023).
15. Sachek B. Y., Merzin A. M. Studies of the performance characteristics of epilaminated materials under conditions of dry friction. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Т. 44, № 1. С. 40–45. URL: <https://doi.org/10.3103/s1052618815010082> (дата звернення: 15.06.2023).
16. Shchepkin V., Poletaev Y. Friction welding of austenitic steel fasteners. *E3S Web of Conferences*. 2020. Т. 210. С. 08012. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021008012> (дата звернення: 15.06.2023).
17. Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel / H.-H. Cho та ін. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Т. 528, № 6. С. 2889–2894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.061> (дата звернення: 16.06.2023).



18. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels / C. Huang та ін. *Materials & Design*. 2022. Т. 216. С. 110544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544> (дата звернення: 17.06.2023).
19. Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting / F. Kara та ін. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Т. 9, № 1. С. 969–983. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.037> (дата звернення: 18.06.2023).
20. Qin B., Wang Z. Y., Sun Q. S. Effect of tempering temperature on properties of 00Cr16Ni5Mo stainless steel. *Materials Characterization*. 2008. Т. 59, № 8. С. 1096–1100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.08.025> (дата звернення: 19.06.2023).
21. Microstructures generated in AISI 316L stainless steel by Vickers and Berkovich indentations / D. Grabco та ін. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. С. 140597. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140597> (дата звернення: 19.06.2023).
22. Making metal: Bryson W. E. *Making Metal. Heat Treatment*. München, 2015. Р. 24–25. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569904862.006> (дата звернення: 19.06.2023).
23. Карбонітрація сталей : thesis / Н. Ю. Негреба та ін. 2020. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/86456> (дата звернення: 19.06.2023).
24. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів [текст]: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.
25. Основи матеріалознавства : Навчальний посібник. / Уклад.: Іваненко І.М. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 190 с.

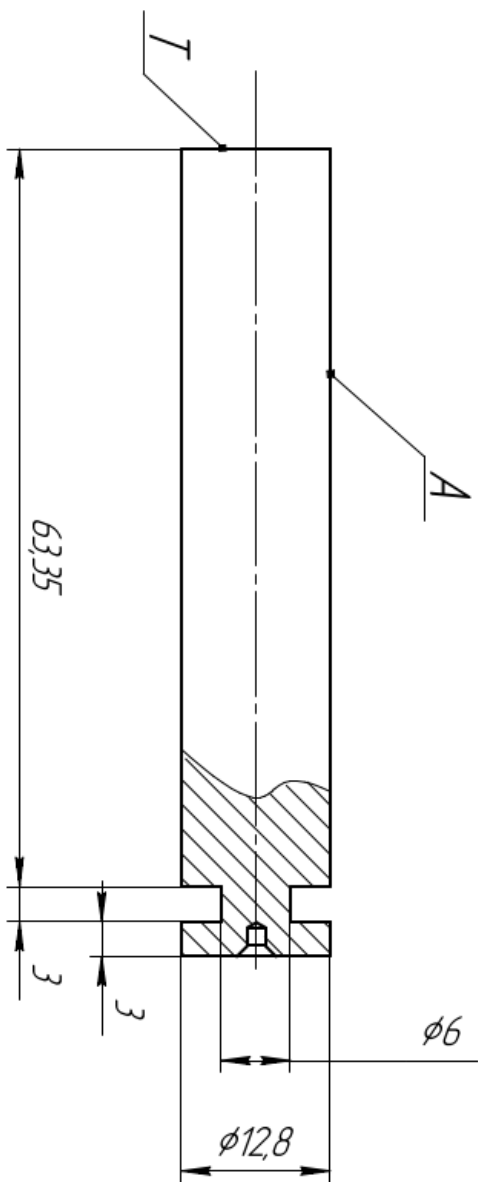
26. Марочник сталей та сплавів. Харків. [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=301](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=301)
27. Berkey E. Ion Probe Mass Spectrometry Analysis of Microstructures. *Microstructural Analysis*. Boston, MA, 1973. С. 287–313. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8693-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8693-7_12) (дата звернення: 19.06.2023).
28. Гуляєв, А. П. Матеріалознавство [Текст] : підручник для вузів / А. П. Гуляєв. М. : «Металлургія», 1976. – 647 с., ил.
29. Mechanics analysis and simulation of material Brinell hardness measurement / G. Leyi та ін. *Measurement*. 2011. Т. 44, № 10. С. 2129–2137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.024> (дата звернення: 19.06.2023).
30. Irving C. Electropolishing Stainless Steel Implants. *Corrosion and Degradation of Implant Materials: Second Symposium*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. С. 136–136–8. URL: <https://doi.org/10.1520/stp33247s> (дата звернення: 19.06.2023).
31. Corrosion behaviour, microhardness and surface characterisation of low energy, high current ion implanted austenitic stainless steel / S. Picard та ін. *Materials Science and Engineering: A*. 2001. Т. 303, № 1-2. С. 163–172. URL: [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(00\)01841-4](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)01841-4) (дата звернення: 19.06.2023).
32. Kuteinikova Z. A., Sidorova T. G., Fuks G. I. Measurement of microhardness by the method of low indenter loads. *Soviet Materials Science*. 1974. Т. 8, № 2. С. 203–207. URL: <https://doi.org/10.1007/bf00732011> (дата звернення: 20.06.2023).
33. Kostyk K. DEVELOPMENT OF INNOVATIVE METHOD OF STEEL SURFACE HARDENING BY A COMBINED CHEMICAL-THERMAL TREATMENT. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. Т. 6. С. 46–52. URL: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00220> (дата звернення: 20.06.2023).

34. He L., Xu Y., Sisson R. D. Modeling the Carbonitriding of Steel. *Materials Performance and Characterization*. 2012. Т. 1, № 1. С. 104389. URL: <https://doi.org/10.1520/mpc104389> (дата звернення: 20.06.2023).
35. Марченко С.В. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. С. В. Марченко, О. П. Гапонова, Т. П. Говорун, Н. А. Харченко. – Суми : Сумський державний університет, 2016. 146 с.
36. Patsenko A. ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ БРІНЕЛЛЯ. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2019. Т. 4, № 56. С. 91–94. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.4.091> (дата звернення: 20.06.2023).
37. Електроматеріалознавство : методичні вказівки. Ч. 1 / укладач : С. В. Савченко ; Центр професійно-практичної підготовки. - Харків : УкрДАЗТ, 2013. - 64 с.
38. Методичні вказівки з дисципліни “Матеріалознавство” до виконання лабораторного практикуму з розділу “Макроскопічний та 70 мікроскопічний методи дослідження матеріалів” для студентів усіх форм навчання / Укл.: В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012. – 43 с.
39. Матеріалознавство : підручник/ С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плешаков; за ред. проф. С. С. Дяченко. – Харків : ХНАДУ, 2007. - 440 с.
40. Cheulyakh Y., Cheulyakh O. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ГАРТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ, МЕТАСТАБІЛЬНІСТЬ АУСТЕНИТУ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНИХ Fe-Cr-Mn СТАЛЕЙ. *Innovative Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*. 2021. № 1. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2021-1-2> (дата звернення: 20.06.2023).
41. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.

42. Тимофєєва Л.А., Комарова Г.Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Ч. 2 – 50 с.

## Додаток А

Замовник	Продукція	Матеріал	Довжина	Зона №	Основа	Назва		Асст	АсстФ
АО "ФЕЛ"						АО "ФЕЛ"-кон-АО "ФЕЛ"-АО "ФЕЛ"			1
Виробник	Продукція	Матеріал	Довжина	Вироб	Деталь	Назва	Матеріал	Твердість	№ операц
				НР-3А	3026.946	Дозуюча голка	Сталь 14Х17Н2	<36 НRC	240 - 290



1. Цементування –  $h=0.50...0.68$  мм. Цементация обов'язкова на поверхнях А і Т.
2. Розміри для довідок

## Додаток Б

Графік режиму термічної обробки деталі «голка дозуюча» зі сталі 14Х17Н2

