

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

Зварювальний факультет

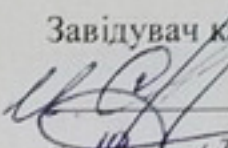
Кафедра інженерії поверхні

«На правах рукопису»

УДК 621.785.53

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 І.В. Смирнов

«16» 12 2019р.

**Магістерська дисертація**

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: «Імпульсно-плазмове азотування трубчастих виробів  
в плазмі тліючого розряду»

Виконав:

студент II курсу, групи ЗП-81мп

Гуторчук Сергій Сергійович

Керівник:

Зав. каф. інженерії поверхні, проф., д.т.н. Смирнов І.В.

Консультант з охорони праці та безпеки  
в надзвичайних ситуаціях:

Зав. каф. охорони праці, промислової та цивільної безпеки

д.т.н., проф.,

Левченко О.Г.

Рецензент:

Доцент, к.т.н.

Мінаков С.М.

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

Студент Гуторчук С.С.

## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми.** Для збільшення твердості, зносостійкості і корозійної стійкості деталей машин і механізмів зазвичай застосовують спеціальні високолеговані сталі і інші дорогі матеріали, через що збільшується вартість всієї машини. Для підвищення ресурсоздатності використовують азотування. Основною перевагою методу є стабільна якість обробки з мінімальним розкидом властивостей від деталі до деталі, від завантаження до завантаження. Однією з головних переваг сучасної плазмової обробки - екологічна безпека.

**Методи і завдання дослідження.** Метою даної роботи є розроблення системи керування процесом імпульсного плазмового азотування в плазмі тліючого розряду трубчатих виробів. Для цього потрібно вирішити наступні задачі: виконати аналіз завдань для азотування трубчатих виробів, виконати аналіз технології тліючого розряду, провести експериментальне дослідження плазмового азотування та виявити основні параметри контролю та керування.

**Об'єкт дослідження** – трубка зі сталі сталь 18ХГТ.

**Предмет дослідження** – технологічний процес плазмового азотування

**Методи дослідження.**

Розробка нового технологічного процесу для плазмового азотування виробу у вигляді циліндра.

**Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:**

Розроблений новий технологічний процес для плазмового циліндричних деталей у плазмі тліючого розряду.

**Практичне значення одержаних результатів.** Застосування нового технологічного процесу на виробництві дасть змогу значно збільшити продуктивність хіміко-термічної обробки циліндричних деталей.

**Магістерська дисертація представлена:** розрахунково-пояснювальна записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з реферату, 5-ти частин, 2 висновків, 28 переліку посилань, та додатків. Обсяг 100 арк. формату А4 та графічної частини 3 арк. формату А1.

**Ключові слова:** дифузійне покриття, азотування, вакуум, тліючий розряд, хіміко-термічна обробка, карбоазотування.

## ABSTRACT

**Actuality of theme.** Special high alloy steels and other expensive materials are usually used to increase the hardness, durability and corrosion resistance of machine parts and mechanisms, which increases the cost of the entire machine. Nitrogenation is used to increase resource efficiency. The main advantage of the method is the stable quality of machining with minimal variation of the properties from part to part, from loading to loading. One of the main advantages of modern plasma treatment is environmental safety.

**Research methods and tasks.** The purpose of this work is to develop a control system for the process of pulsed plasma nitriding in the plasma glow discharge tube products. To do this, you need to solve the following problems: perform a task analysis for the nitriding of tubular products, perform an analysis of glow discharge technology, conduct an experimental study of plasma nitriding, and identify the basic parameters of control and control.

**The object of study** - 18HGT steel tube.

**The subject of the study** - the technological process of plasma nitriding.

**Research methods.**

Development of a new technological process for plasma nitriding of a product in the form of a cylinder.

**The scientific novelty of the obtained results is the following:**

A new technological process has been developed for plasma cylindrical parts in glow discharge plasma.

**The practical significance of the results obtained.** The application of a new technological process at the production will significantly increase the productivity of chemical-thermal treatment of cylindrical parts.

**Master's dissertation presents:** explanatory notes and graphic parts. The explanatory note consists of an abstract, 5 parts, 2 conclusions, 28 references, and appendices. The volume of 100 sheets. A4 size and graphic part 3 sheets. format A1.

**Keywords:** diffusion coating, nitriding, vacuum, glow discharge, chemical-thermal treatment, carboazotation.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	13
1.1 Аналіз видів зношення та умови роботи .....	13
1.2 Аналіз методів та матеріалів для нанесення зносостійких покриттів.....	20
1.3 Постановка задачі .....	34
2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ.....	35
3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕРМО-ХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	59
3.1 Розробка технологічного процесу.....	59
3.1.1 Підготовка деталі .....	59
3.1.2 Очищення деталі та оснастки.....	60
3.1.3 Підготовка оснастки .....	60
3.1.4 Закріплення деталі .....	61
3.1.5 Підготовка вакуумної камери .....	61
3.1.6 Розміщення деталі у камеру .....	63
3.1.7 Перевірка та встановлення термопари.....	64
3.1.8 Відкачування повітря з камери .....	65
3.1.9 Відкачування повітря з камери .....	65
3.1.10 Відкачування повітря з камери .....	66
3.1.11 Завершення процесу .....	69
3.2 Проведення досліджень .....	70
3.2.1 Відрізання зразків .....	70

3.2.2	Ізоляція внутрішньої поверхні .....	70
3.2.3	Шліфування поверхні .....	71
3.2.4	Тралення поверхні .....	72
3.2.5	Дослідження мікроструктури.....	72
3.2.6	Дослідження на твердість.....	73
3.3	Висновок.....	76
4	СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	78
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	84
5.1	Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ).....	85
5.2	Нормативні вимоги безпеки та гігієни праці .....	87
5.3	Інженерні рішення для забезпечення безпеки обладнання .....	89
5.4	Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях .....	92
5.4.1	Пожежна безпека.....	92
5.4.2	Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях .....	94
	ВИСНОВКИ .....	95
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	96
	ДОДАТКИ .....	100

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$\delta_b$  - границя тимчасової міцності;

$\delta_T$  - границя пропорційності (границя текучості для залишкової деформації);

$d_5$  - відносне видовження при розриві;

$u$  - відносне звуження;

KCU - ударна в'язкість;

HВ - твердість по Брінеллю;

T – температура;

E - модуль пружності;

$\alpha$  - коефіцієнт температурного (лінійного) розширення;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності;

$\rho$  - густина матеріалу;

C - питома теплоємність;

R - питомий електроопір;

ФОГФ – фізичне осадження з газової фази;

ХОГФ – хімічне осадження з газової фази ;

ХТО – хіміко-термічна обробка;



## ВСТУП

Для збільшення твердості, зносостійкості і корозійної стійкості деталей машин і механізмів зазвичай застосовують спеціальні високолеговані сталі і інші дорогі матеріали, через що збільшується вартість всієї машини. Щоб знизити вартість деталей машин, можна використовувати і менш дорогі низьколеговані сталі, що пройшли об'ємну зміцнюючу термообробку. Якщо цього недостатньо, то застосовують спеціальні покриття [4] або / і поверхневу хіміко-термічну обробку деталей, поліпшує властивості їх поверхневих шарів деталі, які найчастіше визначають термін служби деталей в цілому. При хіміко-термічній обробці поверхневі шари оброблюваної деталі насичують атомами насичують елементів: азоту (азотування), вуглецю (коксування), бору (борування), кадмію (кадміювання) або декількох елементів одночасно (наприклад карбоазотування або сульфоазотування).

Під час хіміко-термічної обробки нагріта деталь поміщається в середу, що містить згадані елементи. Найчастіше використовують два основних види хіміко-термічної обробки: газову і плазмову [7]. При газовій хіміко-термічній обробці нагріта деталь знаходиться в середовищі газу, що містить потрібний елемент насичення. А при плазмовій обробці деталь занурена в плазму газу, що містить потрібний елемент, іони якого зазвичай прискорюють до деталі за допомогою електричного поля.

В обох випадках поширення насичує елемента в обсязі деталі відбувається під дією термічно активованої дифузії, швидкість якої визначається в основному температурою обробки і градієнтом насичувального елемента. При плазмовій обробці позитивно заряджені іони насичує елемента під дією електричного поля прискорюються у напрямку до деталі, бомбардують її і впроваджуються в неї. Навіть при порівняно невеликій

різниці потенціалів між плазмою і деталлю енергія іонів в тисячі разів більше енергії атомів при газовій обробці. Це дає їм можливість або долати тонкі плакуючі окисні плівки на поверхні деталі і глибше впроваджуватися в деталь при більш низьких температурах, ніж при газовій хіміко-термічній обробці, або розпорошувати ці плівки, що також веде до збільшення швидкості насичення, або, нарешті, створювати градієнт концентрації елемента, що насичується, для прискорення дифузії. Таким чином, швидкість плазмового хіміко-термічної обробки визначається швидкістю самої повільної її стадії - стадії дифузії.

Тому метою даної роботи є розроблення системи регулювання процесом імпульсного плазмового азотування трубчастих виробів у плазмі тліючого розряду. Для цього необхідно вирішити наступні задачі: виконати аналіз процесу; розробити технологію для здійснення процесу; підібрати необхідне обладнання, яке буде задовольняти умови нашого дослід; провести експериментальний дослід; за допомогою лабораторних досліджень провести дослід для отримання результатів.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Аналіз видів зношення та умови роботи

Дійсно, створення якісного сучасного обладнання є одним із найважливіших завдань, які напряду пов'язані з підвищенням міцності агрегатів, деталей та суттєвим підвищенням зносостійкості робочих органів. Також важливу роль у цій справі відіграє застосування та розробка екологічно чистих та безпечних ресурсо та енергоощадних технологій. Особливо в останні роки двадцятого століття розпочалась сильна боротьба за збереження та відновлення навколишнього довкілля. А це є однієї із найважливіших складових для створення екологічно чистих методів обробки деталей та вузлів. Однією з головних задач, які стають перед конструктором, є удосконалення та створення більш нових та сучасних вузлів тертя. У свою чергу це передбачає розробку конструкцій зі збільшенням їх ресурсоздатності та продуктивності, які майже постійно супроводжуються збільшенням теплового та механічного навантаження деталей, що рухаються та працюють в умовах тертя.

Одним із різновидів зміцнення деталей є зміцнення трубчатих та циліндричних деталей. Основа складності обробки цих деталей є обробка внутрішньої циліндричної поверхні відносно малого діаметру. До трубчатих виробів можемо віднести: гільзи циліндрів, колінчаті та розподільчі вали, труби для буріння скважин, стволи зброї тощо. Зміцнення внутрішньої поверхні циліндричного виробу без високо термічного впливу, та хорошим зчепленням с основою демонструє досить важку технологічну задачу. Також основною проблемою при зміцненні є рівномірне нанесення захисного покриття. Існують безліч видів зміцнення поверхні, а саме: лазерне зміцнення,

електрохімічні обробки, поверхнево пластична деформація, обкатка роликом. Також можна зміцнювати поверхні плазмовим наплавленням та напиленням, якщо діаметр внутрішнього отвору дозволяє проводити такі види робіт. Головна причина низької якості робочих органів полягає у відсутності спеціалізованих матеріалів, що мають високі фізико-механічні характеристики при експлуатації в умовах великих знакозмінних навантажень і абразивного зношування. Адже в більшості випадків внутрішня циліндрична поверхня працює в умовах абразивного, кавітаційного, утомного, адгезійного та фретингового зношування. Для більш детального огляду внутрішньої циліндричної поверхні та видів зношування які діють у ході експлуатації виробу, візьмемо для прикладу ствол модернізованого автомата Калашникова зразку 1974 року.

Автомат калібру 5.45 мм зразку 1974 року призначений для знищення та ураження вогневих засобів та живої сили противника, а також автомат являється індивідуальною зброєю у стрілецькому відділенні. Одним із найважливіших факторів є живучість ствола, який являється одним із важливіших робочих органів автомату. Живучість ствола, як основного елемента автомату, є найважливішим фактором, що визначає живучість зброї у цілому, а також бойове, експлуатаційне і економічні характеристики систем автомату в цілому. Живучість ствола – це здатність його зберігати під час експлуатації основні характеристики зброї в умовах бойового застосування і при інтенсивному розігріві ствола протистояти механічному впливу в основному на нарізку ствола. [27]

Загальна кількість зроблених пострілів автоматом оцінює саму живучість автомата. Зношування проявляється на поверхні каналу ствола і зовні в зниженні початкової швидкості кулі на зрізі ствола, а також помічається зменшення кучності пострілів.

Теплові впливи порохових газів, як за звичай, являються основною причиною зносу ствола у ході його використання. Як для прикладу, під час інтенсивного ведення стрільби, температура ствола може досягати 1500 – 2000K, при таких температурах ствол починає розширюватись, а відповідно діаметр каналу ствола починає зменшуватися. Це призводить до виникнення значних сил тертя між кулею та нарізною частиною під час пострілу. [27]

У зброї яка має високий темп стрільби нагрів каналу ствола від пострілу до пострілу збільшується, тому що за час між пострілами ствол не встигає охолонути. [27]

Підвищення температури матеріалу ствола до значень, які вказані вище, може призвести до швидкого стирання та руйнування нарізу в стволі, також, в окремих випадках, навіть до втрати стволом міцності, а це в свою чергу впливає на точність і кучність стрільби. [27]

На виріб, що описаний вище, під час експлуатації діють різні види спрацьовування. Кожен з них має різний характер та критерії спрацьовування. Спрацьовування це процес під час якого відбувається відокремлення або руйнування матеріалу з поверхні виробу, що призводить до збільшення його залишкової деформації. Під час додання різних за видом і інтенсивністю актів руйнування, зміні фізико-механічних та механічних властивостей матеріалу під дією зовнішніх факторів (швидкість переміщення, вид тертя, тиск, температура, середовище) відбувається утворення поверхні, що в подальшому використанні буде спрацьовуватися. Вся ця сукупність ознак під час зношування і визначає інтенсивність та вид спрацьовування. Так як деталь одночасно зазнає вплив декількох видів спрацьовування, важливо визначити положення про головний та супутній види зношування. [1]

Під провідним процесом розуміють процес, що переважає що своїм кількісним і якісним показником зношування всі інші процеси спрацьовування поверхонь тертя.

У першому наближенні вид спрацьовування можливо побачити візуально з такими ознаками, як вигляд поверхні тертя. Щоб більш детально проаналізувати вид спрацьовування потрібно досліджувати фізичні і механічні властивості поверхневого шару.

Класифікація видів спрацьовування згідно з ГОСТ 27674-88 наведена у табл. 1.1 [10]

Таблиця 1.1 – Класифікація видів спрацьовування [10]

Ознака класифікації	Види спрацьовування
Види механічного спрацьовування	Абразивне спрацьовування; гідроабразивне (газоабразивне) спрацьовування; гідроерозійне (газоерозійне) спрацьовування; кавітаційне спрацьовування; спрацьовування від втоми; спрацьовування при фретінгу; спрацьовування при заїданні
Види корозійно – механічного спрацьовування	Окислювальне спрацьовування, спрацьовування при фретінг - корозії
Види спрацьовування при дії електричного струму	Електроерозійне спрацьовування

Розрізняють два найінтенсивніших видів зношування поверхні каналу ствола:

- ерозійний;
- термопластичний.

Ерозійне зношування. При різкому нагріванні в процесі пострілу і наступному швидкому охолодженні на поверхні каналу ствола утворюються дрібні тріщини, які в результаті подальшого теплового і хімічного дії газів

розпалюються, (тобто відбувається оплавлення і знос оплавленого металу з поверхні каналу ствола). Цей процес супроводжується поступовим механічним стиранням поверхні каналу ствола кулею. Зрештою, утворюється такий зазор між кулею і стінками стовбура, через який відбувається інтенсивна витік порохових газів, тиск у стволі інтенсивно знижується, зменшується початкова швидкість кулі. Цей вид зносу спостерігається на початковій ділянці руху снаряда в зоні високого тиску і характерний для зброї з низьким темпом стрільби  $<1000$  п/хв.

Ерозійний знос може спостерігатися в газовідвідних отворах ствола. Природа його появи ідентична ерозійного зносу нарізної частини каналу ствола. Цей вид зносу призводить до порушення правильного функціонування автоматики зброї і виходу її з ладу.

Термопластичне зношування. В результаті напруженого режиму стрільби відбувається інтенсивний розігрів матеріалу ствола на глибину 1 – 1.5 нарізу, в результаті чого втрачаються його властивості міцності. Цей шар каналу ствола, що піддається найбільш інтенсивному розігріву при стрільбі, прийнято називати робочим шаром каналу ствола. [1]

При невеликих проміжках між пострілами тепло не встигає відводитися від внутрішньої поверхні ствола до зовнішньої. Температура поверхні близької до робочої, після черги пострілів підвищується, а міцність падає.

Також канал ствола зазнає видів спрацьовування таких як:

- абразивне зношування;
- зношування від втоми;
- корозії;
- внаслідок пластичної деформації;
- окислювання.

Розглянемо більш детально дані види зношування.

Абразивне зношування – це один із видів руйнування поверхні деталі в наслідок його взаємодії з абразивом (твердими частинками). До абразивних матеріалів можна віднести матеріали як природнього так і штучного походження, які мають зерна, що мають здатність до різання або дряпання поверхні, за рахунок достатньої твердості.[1]

Найчастіше такими частинками зазвичай бувають:

- тверді частинки різних матеріалів;
- мікровиступи;
- пісок;
- металева стружка;
- нагар;
- продукти зносу, що потрапили в зону силового контакту поверхні, що сполучені між собою.

Дані частинки можуть знаходитися в двох станах: у вільному, та у закріпленому. Досить різноманітна кількість деталей має схильність до данного виду спрацьовування, що працюють, безпосередньо, в абразивному середовищі.[10]

Поверхня деталі може бути зруйнована як в результаті одноактного впливу абразиву, так і багатоактного процесу деформування поверхні абразивними частинками. На процес абразивного зношування впливають різні чинники:

- природа абразивних частинок;
- форма і розмір частинок;
- агресивність середовища;
- властивість зношування поверхні;
- ударна взаємодія;
- температура і т.п..



Втомним механічним зношуванням називається процес в результаті якого відбувається руйнування при повторному деформуванні мікрооб'єктів матеріалу поверхневого шару. Даний вид зношування виникає як при терті ковзання, так і кочення. [10]

Зазвичай, процес втомного зношування пов'язаний з поступовими багаторазовими повторюваними циклами напруг там де присутній контакт кочення або ковзання. У процесі тертя на робочій поверхні деталей виникають максимальні напруги стиснення, а по глибині матеріалу деталі поширюються спрямовані дотичні напруження, максимум яких концентрується на деякій відстані від точки їх контакту.

Інтенсивність втомного зношування визначається наступними факторами:

- наявність залишкових напружень в поверхнях концентраторів напружень (оксидів, дислокацій, інших великих включень);
- якістю поверхні (мікропрофіль, забруднення, вм'ятини, подряпини, задири, канавки, риски);
- розподілу навантажень в сполученні (пружними деформаціями, перекосом деталей, зазором);
- видом тертя (кочення, кочення або ковзання з просковзуванням);
- наявністю мастильного матеріалу та його типу

При механічній взаємодії деталей в поверхневих шарах матеріалу виникає складний напружений стан: перед виступом шорсткості утворюється зона стиснення матеріалу, а за виступом - зона розтягування. В результаті такого знакозмінного циклового впливу в мікро об'ємах матеріалу накопичуються пошкодження, що знижують його міцність. Накопичення втомних мікропошкоджень веде до руйнування поверхневих шарів матеріалу в зоні тертя. [2]

## **1.2 Аналіз методів та матеріалів для нанесення зносостійких покриттів**

Специфічні умови роботи ствола автомату викликають швидке руйнування ствола, що призводить до скорочення їх терміну служби, збільшення часу і трудомісткості обслуговування виробу, тому їх поверхню часто піддають зміцненню різними способами. [22]

Для зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних отворів використовують наступні методи:

- термічна обробка;
- поверхневе загартовування;
- хіміко-термічна обробка.

Термічна обробка різних видів сталей є ефективним способом підвищення міцності деталей. При її використанні, зносостійкість як правило, підвищується але недостатньо. Тому, при обов'язковому застосуванні термічної обробки часто використовують додаткові методи зміцнення. [9]

При виборі методу зміцнення робочих органів необхідно враховувати різні критерії [8]:

- умови експлуатації деталей (питомий тиск, ударні навантаження і їх рівень і ін.);
- матеріал деталі і його властивості;
- геометричні розміри і конфігурацію робочої поверхні деталі;
- величина і характер зносу деталей;
- можливість виключення механічної обробки зміцнюючих поверхонь;
- характеристики способів, технічно можливих до застосування (продуктивність, можливість отримання шарів з заданими службовими властивостями, простота технології, можливість

механізації і автоматизації виробництва, економічний фактор та інше);

- можливість певної зміни конструкції деталі, внаслідок застосовуваного методу зміцнення.

До завдань поверхневої обробки входить зміцнення або пом'якшення, в залежності від необхідності, поверхневого шару виробу, при одночасному збереженні в'язкості внутрішньої структури. З цією метою використовуються такі методи нагріву як[9]:

- нагрів металу струмами високої частоти;
- в сольових і електролітних ваннах;
- контактний метод;
- індукційний спосіб;
- використання газополуменевої термообробки.

Термообробка поверхні відбувається при температурах, значення яких вище критичних приблизно на 30-60 ° С. Час витримки виробу при підвищеній температурі залежить від таких факторів як спосіб термообробки, розміри оброблюваної поверхні і маса заготовки. [8]

Після нагрівання, наступний етап є швидке охолодження, який дає можливість зберегти одночасно і в'язкість внутрішніх шарів, і твердість поверхневих. Цей етап проходить з різною швидкістю, яка залежить від теплопровідності металу, розмірів деталі, необхідної структури металу. До безперечних переваг поверхневої термообробки можна віднести високу продуктивність, відсутність знеуглеводнення металів і окислення поверхні, малі напруги. [16]

Одним з найбільш поширених способів поверхневої термообробки є газополуменевий метод. Це пов'язано з тим, що обладнання для нього стоїть дуже недорого. Газополуменеве гартування здійснюється переважно за допомогою ацетиленово-кисневого полум'я, хоча в окремих випадках можуть

також використовуватися заміники ацетилену. Така обробка може проводитися з виробами з вуглецевих, низьковуглецевих і низьколегованих сталей, з різних чавунів.

Недоліками даного методу є вимога до повільного охолодження, що означає на практиці значне зниження продуктивності процесу, налаштування обладнання. Також цей метод не є екологічно чистим у використанні, особливо при газополуменевому загартуванні.

Для збільшення твердості, зносостійкості і корозійної стійкості деталей машин і механізмів, зазвичай, застосовують спеціальні високолеговані сталі і інші дорогі матеріали, через що збільшується вартість всієї машини. Щоб знизити вартість деталей машин, можна використовувати і менш дорогі низьколеговані сталі, що пройшли об'ємну зміцнюючу термообробку. Якщо цього недостатньо, то застосовують спеціальні покриття [7] або / і поверхневу хіміко-термічну обробку деталей, яка поліпшує властивості їх поверхневих шарів, які найчастіше визначають термін служби деталей в цілому.

При хіміко-термічній обробці поверхневі шари оброблюваної деталі насичують атомами елементів: азоту (азотування), вуглецю (коксування), бору (борування), кадмію (кадміювання) або декількох елементів одночасно (наприклад карбоазотування або сульфоазотування). Під час хіміко-термічної обробки нагріта деталь поміщається в середу, що містить згадані елементи. Найчастіше використовують два основних види хіміко-термічної обробки: газову і плазмову [27]. При газовій хіміко-термічній обробці нагріта деталь знаходиться в середовищі газу, що містить потрібний елемент насичення. А при плазмовій обробці деталь занурена в плазму газу, що містить потрібний елемент, іони якого зазвичай прискорюються до деталі за допомогою електричного поля. В обох випадках розповсюдження елемента насичення в обсязі деталі відбувається під дією термічно активованої дифузії, швидкість

якої визначається в основному температурою обробки і градієнтом насичення елемента.

При плазмовій обробці позитивно заряджені іони, що насичують елемент під дією електричного поля прискорюються у напрямку до деталі, бомбардують її і впроваджуються в неї. Навіть при порівняно невеликій різниці потенціалів між плазмою і деталлю енергія іонів в тисячі разів більше енергії атомів при газовій обробці. Це дає їм можливість або долати тонкі окисні плівки на поверхні деталі і глибше впроваджуватися в деталь при більш низьких температурах, ніж при газовій хіміко-термічній обробці, або розпорошувати ці плівки, що також веде до збільшення швидкості насичення, або, нарешті, створювати градієнт концентрації елемента насичення, що прискорює дифузію. [6]

Плазмове азотування – плазмова хіміко-термічна обробка – технологія насичення поверхневих шарів сталевих виробів в плазмі, що містить азот при зниженому тиску, яка збуджена електричним розрядом. Модифікація поверхні деталі відбувається за рахунок надходження на неї атомарного азоту і бомбардування іонами азоту з плазми газового розряду, імплантації його атомів через цю поверхню і подальшої дифузії вглиб деталі. [15]

Проникнувши в поверхневий шар сталі атоми азоту дифундують за обсягом стали. Залежно від тривалості обробки виникає відповідний концентраційний профіль, що характеризує розподіл азоту за глибиною. Якщо на поверхні концентрація азоту досягає величини, необхідної для утворення  $\gamma'$ - і  $\epsilon$ -нітриду, то відзначається утворення саме цих нітрідів. Вони ростуть з окремих зародків і швидко утворюють суцільний шар, званий нітрідним, або «шаром з'єднань». Товщина шару, незалежно від вмісту азоту в якій звичайно застосовуються середовищах, збільшується в результаті подальшого поглинання азоту відповідно до першого закону дифузії Фіка, тобто приблизно пропорційна кореню квадратному з тривалості обробки. Одночасно триває

дифузія атомів азоту через шар з'єднань углиб металу. При цьому швидкість їх дифузії через  $\gamma'$ -фазу приблизно в 25 разів, а через  $\epsilon$ -нітрид навіть в 60 разів менше, ніж через ферит.[26]

В результаті обробки в приповерхневих шарах сталевих деталей можуть утворитися шари з різним вмістом азоту. Найвищою концентрацією азоту володіє зовнішній шар  $\epsilon$ -фази ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ). За ним глибше лежить шар з меншою концентрацією азоту  $\gamma_1$ -фаза ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Ще глибше перебуває шар  $\gamma$ -фази (дифузійна зона). Далі знаходиться вже вихідний матеріал, наприклад  $\alpha$ -фаза заліза (у низьковуглецевих сталях). При недостатньому ступені обробки верхні шари можуть бути відсутні. Шар з'єднань і дифузійна зона разом утворюють азотований шар. В дифузійній зоні азот утворює твердий розчин в залізі, в якому межа розчинності азоту в залізі не перевищено. [26]

В дифузійній зоні азот створює твердий розчин в залізі, у якому границя розчинності азоту у сталі не перевищена. Його поодинокі атоми є атомами проникнення. Коли концентрація азоту зростає у напрямку до поверхні і границя розчинності в металі буде перевищено, формуються дуже дрібні преципітати нітридів [13]. Ще ближче до поверхні концентрація азоту настільки висока, що утворюються нітридні шари, що складаються із фаз  $\text{Fe}_4\text{N}$  і  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ . [20]

При низьких температурах модифікований поверхневий шар в сталі головним чином складається з метастабільною фази, відомої як перенасичина аустенітом, що володіє високою твердістю і має дуже добру корозійну стійкість.. Коли в цій фазі з'являються преципітати нітридів елементів, що утворюють нітриди, твердість збільшується. А в зоні нітридів  $\text{Fe}_4\text{N}$  і  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ , званої білим шаром через його кольору після полірування і травлення поверхні, досягається найвища твердість [13].

Плазмовим азотуванням можливо покращити наступні характеристики виробів:

- твердість;
- зносостійкість;
- втомну витривалість;
- тріботехнічні властивості;
- теплостійкість;
- корозійну стійкість.

Основною перевагою методу є стабільна якість обробки з мінімальним розкидом властивостей від деталі до деталі, від завантаження до завантаження. Однією з головних переваг сучасної плазмової обробки - екологічна безпека. Обробка здійснюється в низьководневому або безводневому газовому середовищі, тому повністю відсутня загроза пожежі і вибуху. Крім того, процес проводять у вакуумній камері, що не вимагає прийняття спеціальних заходів проти забруднень навколишнього середовища. Тому плазмова хіміко-термічна обробка - це екологічно чистий, ресурсо - та енергозберігаючий, тобто економічно вигідний процес.

Раніше були спроби азотування циліндричних виробів у плазмі тліючого розряду. Схема даного процесу (рис.1.1) передбачала собою розміщення трубки у вакуумній камері та обертання її під час процесу. [11]

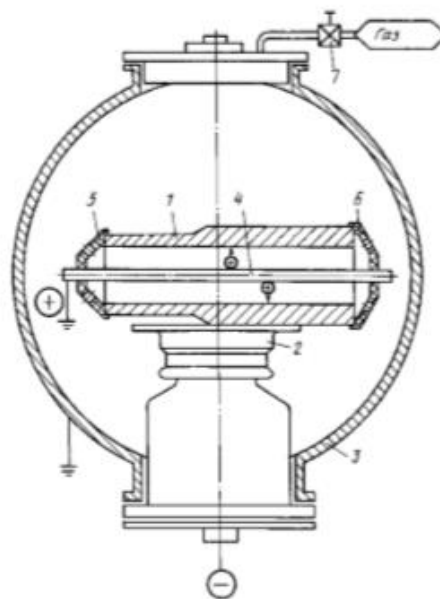


Рисунок 1.1 – Схема процесу азотування [11]

Напруга процесу складала 5000 В. При такій напрузі та тривалістю процесу до 16 годин, поверхня труба зазнавала структурних змін, а також в деяких місцях деформувалась. Щоб компенсувати нагрівання деталі, було обраний варіант зі зменшенням робочого тиску у камері. При даному рішенні, азотування не відбулося, це пов'язано з тим, що у робочій камері не було достатнього вмісту концентрації азоту. Всі ці недоліки та похибки були взяті до уваги. Також далі у цій роботі приведені варіанти рішення цих проблем.[11]

Плазмові карбонізація та карбоазотування - процеси плазмової хіміко-термічної обробки, в яких поверхневі шари деталі легуються вуглецем. Ці процеси мало відрізняються від азотування, і багато в чому ці процеси аналогічні. Для цього в плазму газового розряду додатково вводять вуглевмісні добавки: в переважній кількості метан  $\text{CH}_4$ , також використовують крім нього ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$ , пари спирту  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  або вуглекислий газ  $\text{CO}_2$ . При цьому основним плазмоутворюючим газом може бути:

- азот;
- водень;
- суміш азоту та водню;
- суміш аргону і водню;
- суміш аргону і азоту.

Спроби поліпшити механічні параметри шляхом азотування, як показано вище, приводили до одночасного зниження корозійної стійкості, якщо для підвищення продуктивності процес вели при високих температурах. Поєднати поліпшення механічних і хімічних властивостей деталей з аустенітних нержавіючих сталей вдалося, використовуючи процес карбонізації.[5]

Проблема карбонізації полягала в тому, що для збереження корозійної стійкості сталі було необхідно уникнути утворення в карбонізованих шарах



карбіду хрому. А для досягнення високої здатності сталі витримувати механічні навантаження потрібно створити слої максимальної товщини. Обидва ці вимоги суперечливі, їх виконання залежить від параметрів процесу карбонізації.

Режими карбонізацію і азотування хоч і схожі між собою, але мають деякі відмінності. Температура під час обробки були в діапазоні 300–600 °С, а тривалість – 3-40 годин. Під час плазмової обробки використовується газова суміш 2 %  $\text{CH}_4$  + 98 %  $\text{H}_2$  при робочому тиску в камері від 200 до 1000 П. По закінченню обробки розряд вимикають і деталь охолоджується в камері до кімнатної температури в тому ж середовищі. [25]

Для нашої деталі оптимальна температура процесу становить від 200 – 300 °С. Температура більше 300 °С недопустима, тому що зона термічного впливу нашої деталі дуже негативно впливає на суму деталей, що призводить до зменшення ресурсоспроможності.

Таким чином, для підвищення механічних властивостей і корозійної стійкості сталевих деталей використовується плазмова карбонізація, тобто процес обробки, аналогічний азотуванню, але з додаванням в плазму деякої кількості, що містить вуглець газу з таких, як  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  або  $\text{CO}_2$ , але найчастіше метану . Така обробка приводить до утворення на поверхні деталі шару твердого карбонізованого заліза через дифузії вуглецю через поверхню сталі. А це призводить до зменшення корозійної стійкості нашої деталі.

Порівняння результатів азотування і карбонізації, проведених в однакових умовах, виконано в роботі [100]. У ній досліджували поведінку аустенітної сталі AISI-316 після хіміко-термічної обробки при спільній дії хімічної атаки і механічного зносу. Проблема полягає в тому, що окисна плівка, що утворюється на поверхні аустенітної нержавіючої сталі, руйнується і видаляється під дією потоку корозійно-ерозійної суспензії, що містить тверді

частки, що призводить до видалення захисту від корозії. У свою чергу корозія може також знизити опірність поверхні аустенітної нержавіючої сталі дії ударних частинок, що збільшує швидкість ерозії. Механічний процес видалення матеріалу через ерозію і електрохімічний процес корозії відбуваються майже спільно, через що загальні втрати матеріалу суттєво більше, ніж сума втрат від цих процесів окремо. [2]

Зразки зі сталі AISI-316 полірували до дзеркального блиску. Плазмове азотування і карбонізацію в тліючому розряді. Режими цих процесів вказані в таблиці 1.2. [22] Після закінчення обробки зразки охолоджувалися до 60 ° С в тому же газовому середовищі.

Отриманий розподіл азоту і вуглецю по глибині зразка показано на рис. 1.2 максимум концентрація азоту була 25 мас. % і лише 5 мас. % у вуглецевій фазі  $\gamma$ C. Крім того, видно, що глибина азотної фази  $\gamma$ N більше, ніж у вуглецевої фази  $\gamma$ C. Твердість азотованої поверхні (1237 HV) була набагато вищою, ніж карбонізованої (690 HV) і значно вище, ніж у необробленого зразка (200 HV 0,01) (табл. 1.3). [18]

Таблиця 1.2 - Параметри низькотемпературних плазмових обробок [18]

Плазмова обробка	Температура, °C	Тривалість процесу, год	Склад суміші	Тиск в робочій камері, Па	Напруга, кВ
Азотування	400	10	75% $H_2$ + 25% $N_2$	400	1.7
Карбонізація	400	10	98% $H_2$ + 2% $CH_4$	400	1.7

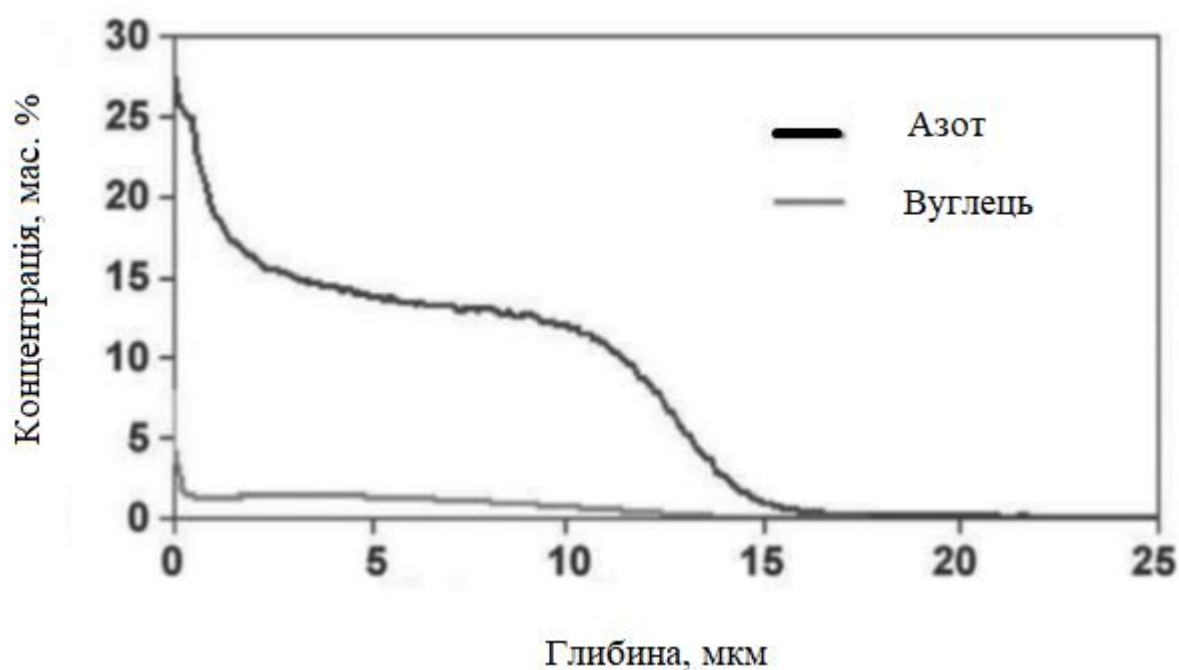
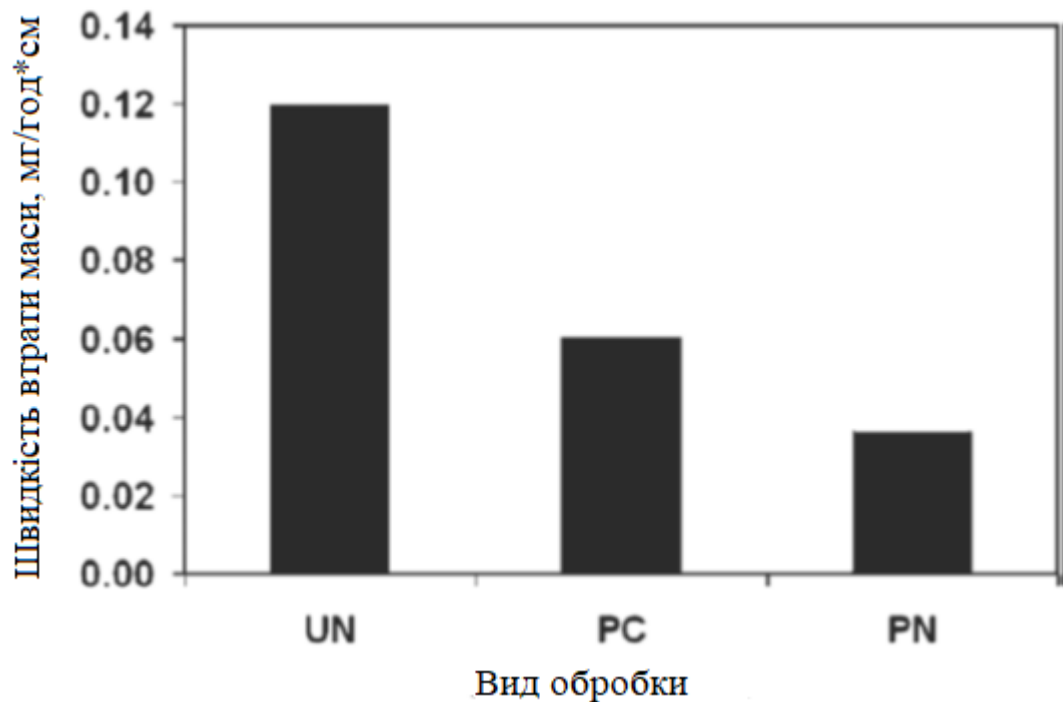


Рис. 1.2 - Розподілення азоту и вуглецю по глибині зразка [22]

Таблиця 1.3 - Параметри отриманих поверхонь [22]

Зразок	Поверхнева твердість, HV	Товщина слоя, мкм
Не оброблений	200	-
Карбонізація	690	15
Азотування	1240	10

Швидкість загального зносу оцінювалися по втраті маси зразків під час ерозійно-корозійних випробувань. Вона показана на рисунку 1.3. Чітко видно, що низькотемпературна обробка може ефективно покращити ерозійно-корозійну стійкість нержавіючої сталі AISI-316 при цьому плазмове азотування більш ефективне. [2]



UN – азотування; PC – карбонізація; PN – не оброблений

Рисунок 1.3 - Ефект вигляду плазмової обробки на загальну швидкість втрати маси різних зразків[22]

Для активізації газової фази використовують різні види електричних розрядів:

- дуговий тліючий розряд;
- іскровий і коронний розряд;
- магнітні і електростатичні поля.

Найбільшого поширення в даний час отримує процес азотування азотом в плазмі тліючого розряду. У розрідженій азотовмісній атмосфері між катодом (деталь) і анодом (камера) збуджується тліючий розряд, іони газу, бомбардуючи поверхню катода, нагрівають її до температури насичення. Температура азотування 200-450 ° С, розрідження 1-10 мм рт. ст., робоча напруга коливається від декількох хвилин до 24 год. Інтенсифікація процесу при іонному азотуванні пояснюється впливом тліючого розряду на всі елементарні процеси, відповідальні за утворення дифузійного шару: активацію газової фази, адсорбцію і дифузію.[5]

В даний час установки для азотування, що працюють на тліючому розряді, майже повністю витіснили установки для газового і рідкого азотування. Це пов'язано, перш за все, з тим, що процес іонного азотування в них виявляється найбільш швидким і ефективним. Під час процесу азотування катодне падіння знаходиться в інтервалі 600 – 800 В в залежності від режиму азотування. Катодне падіння повністю визначає енергію іонів і, як наслідок, швидкість азотування і глибину шару. Тому збільшення катодного падіння напруги може вплинути на режим азотування в кращу сторону. [22]

Збільшення катодного падіння можна різними способами. Наприклад, перевести нормальний тліючий розряд в аномальний. Але при цьому буде збільшуватися потужність, що виділяється на катоді, що може привести до перегріву деталі. Можна також використовувати магнетронні системи розряду які складні в реалізації.

Більш прийнятним є використання імпульсного тліючого розряду. Імпульсний режим тліючого розряду повинен забезпечуватися ключем встановленим в катодному колі. Як показують досліді такий спосіб формування розряду дозволяє збільшити катодне падіння в 2-3 рази в порівнянні зі звичайним тліючим розрядом без збільшення потужності, що виділяється. На рисунку 1.4 та 1.5 видно, що азотування в імпульсному тліючому розряді має перевагу над стаціонарним тліючим розрядом. [22]

Дані графіки показують, що азотування за допомогою тліючого розряду має більше переваг за стаціонарний розряд. При азотуванні тліючим розрядом ми маємо більшу твердість та глибину проникнення.

Під час азотування протязі 8 годин максимальне значення мікротвердості і глибини проникнення азотированного шару, одержані в стаціонарному і імпульсному тліючому розряді практично не відрізняється. Однак слід зауважити, що при азотуванні в плазмі тліючого розряду з

періодичним перериванням струму граничні характеристики спостерігаються вже при часу азотування 2-3 години.

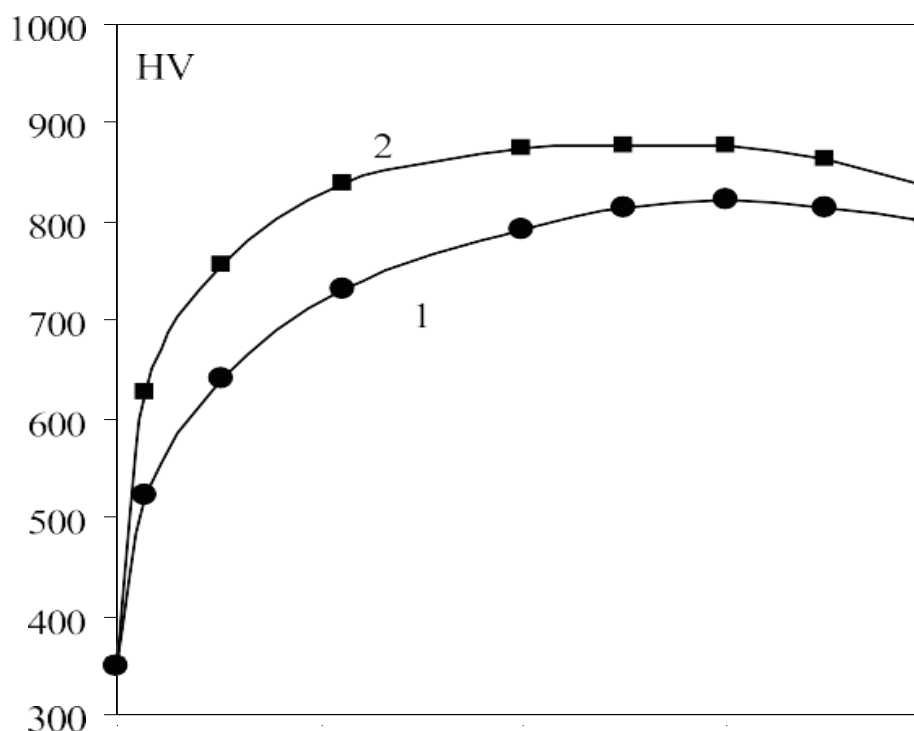


Рисунок 1.4 - Залежність мікротвердості азотованого шару по Вікерсу HV від часу азотування t: 1 – стаціонарний тліючий розряд; 2 – імпульсний тліючий розряд [22]

Під час азотування напротязі 8 годин максимальне значення мікротвердості і глибини проникнення азотированного шару, одержані в стаціонарному і імпульсному тліючому розряді практично не відрізняється. Однак слід зауважити, що при азотуванні в плазмі тліючого розряду з періодичним перериванням струму граничні характеристики спостерігаються вже при часу азотування 2-3 години.

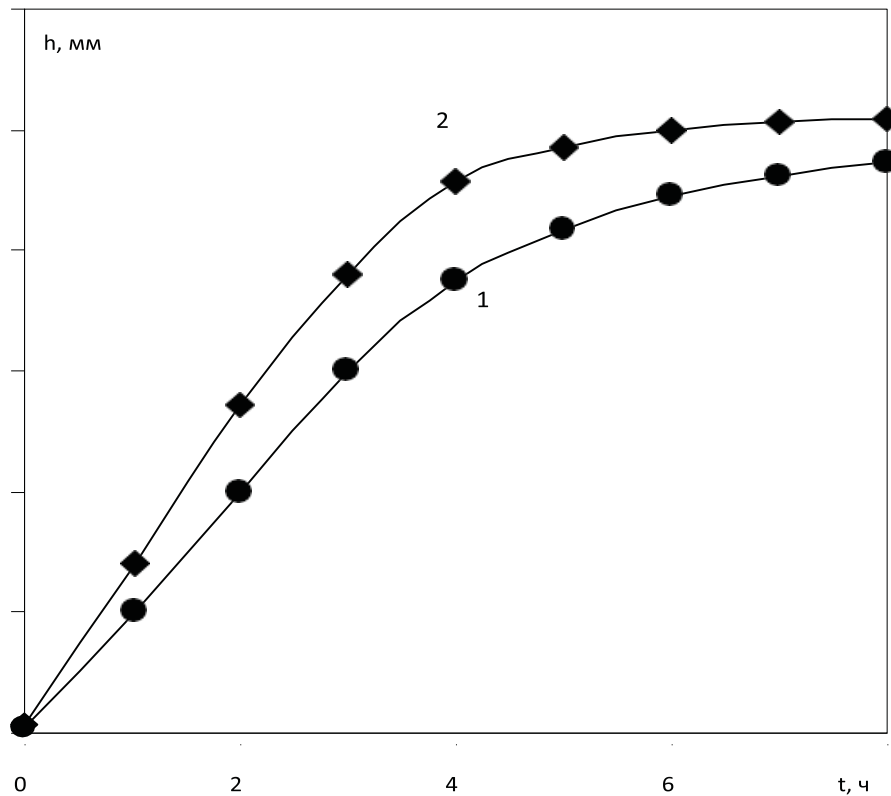


Рисунок 1.5 - Залежність глибини азотованого шару по  $h$  від часу азотування  $t$ : 1 – стаціонарний тліючий розряд; 2 – імпульсний тліючий розряд [22]

Ті ж параметри в традиційному тліючому розряді реалізуються за час азотування 6-7 годин. При більшому часу азотування (більше 6 годин) переваги азотування в імпульсному тліючому розряді в порівнянні з тліючим розрядом незначні. Це пов'язано з тим, що визначальним процесом азотування в цьому випадку становит- ся дифузія атомів азоту в сталі, яка зави сит в основному тільки від температури.

Аналогічні результати досягаються при іонному азотуванні в переривчастому режимі. Завдяки використанню пульсуючого струму розряду і газотермічних циклів насичення приповерхневих шарів, значно скорочуються час обробки, витрати електроенергії і реакційних газів, поліпшуються експлуатаційні характеристики деталей, тому що через нищюку

температури і малого часу впливу не відбувається знеміцнення сердцевини виробів. [22]

### **1.3 Постановка задачі**

Аналіз, що був проведений вище показав, що застосування та розробка нових економічно та екологічно чистих технологій є складним та досить важливим завданням. Тому виходячи з аналізу методів обробки деталі ми обрали імпульсне плазмове азотування в плазмі тліючого розряду. Застосування даного методу термо-хімічної обробки дає змогу нам проводити зміцнення поверхневого шару отворі відносно малого діаметру, досягти збільшення твердості та корозійної стійкості поверхні, що оброблюється. Також даний метод являється екологічно чистим.

Тому метою даної роботи являється розробка та регулювання процесу азотування для обробки трубчатих виробів. Для цього потрібно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати технологічну систему процесу азотування у тліючому розряді.
2. Провести експериментальний дослід використання методу азотування в плазмі тліючого розряду. Метою якого є визначити ефективність застосування технології.
3. Визначення параметрів стабілізації процесу.



## 2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ

У даній роботі, для іонного азотування, як зразок, ми використовували металеву трубку (рис.2.1), із зовнішнім діаметром 25 мм, із внутрішнім діаметром 12 мм та довжиною 240 мм. зробленої зі сталі 18ХГТ ГОСТ 4543-71.

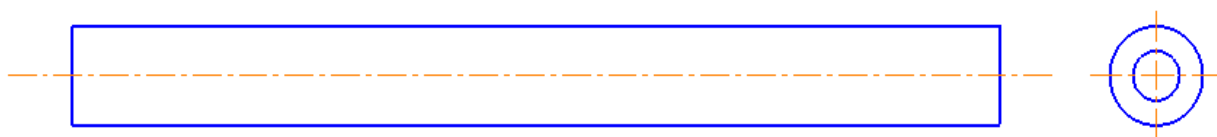


Рисунок 2.1 – Зразок для дослідів

Дана сталь відноситься до класу конструкційних легованих сталей. Вона використовується для відповідальних вузлів та деталей, від яких потребується підвищена міцність і в'язкість серцевини, а також висока поверхнева твердість яка працює під впливом ударних навантажень. Хімічні, механічні та фізичні властивості даної сталі наведені у табл. 2.1, 2.2, 2.3 відповідно. [21]

Таблиця 2.1 - Хімічний склад у % сталі 18ХГТ ГОСТ 4543 - 71 [21]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
0.17 – 0.23	0.17 – 0.37	0.8 – 1.1	до 0.3	до 0.035	до 0.035	1 – 1.3	0.03 – 0.09	до 0.3

Легуючі елементи підвищують корозійну стійкість, міцність, зменшують небезпеку крихкого руйнування. Хром надає сталі міцності і робить її стійкою до корозії. Марганець підвищує опір ударним навантаженням, додатково підсилюючи міцність сплаву, а також сприяє

зносостійкості сталі. Додавання кремнію необхідно для збільшення показника ударної в'язкості. Данна сталь має стійкість до крихкості при відпуску під час загартування. [21]

Таблиця 2.2 - Механічні властивості матеріалу 18ХГТ при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  [21]

Границя короточасної міцності, $\sigma_{\text{в}}$ (МПа)	980
Границя текучості, $\sigma_{\text{т}}$ (МПа)	730
Відносне збільшення при розриві, $\delta_5$ (%)	15
Відносне стискання, $\psi$ (%)	55
Ударна в'язкість, КСУ (кДж / м <sup>2</sup> )	1130
Твердість матеріалу НВ $10^{-1}$ , МПа	217

Таблиця 2.3 - Фізичні властивості матеріалу 18ХГТ [21]

T	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^6$	$\lambda$	$\rho$	C
Град	МПа	1/Град	Вт/(м*град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг*град)
20	2.11	-	37	7800	
100	2.05	10	38		495
200	1.97	11.5	38		508
300	1.91	12.3	37		525
400	1.76	12.8	35		537
500	1.68	13.3	34		567
600	1.55	13.6	31		588

Для іонного азотування будемо використовувати установку ВУ – 1Б (рис2.2). Данна установку призначена для нанесення тонкоплівкових зносостійких покриттів завтовшки від 4мкм до 10 мкм за допомогою конденсації суміші у вакуумній за допомогою іонного бомбардування. Експлуатація установки повинна відбуватися у закритих сухих приміщеннях, температура навколишнього середовища від +17 °С до +27 °С. Технічні характеристики установки приведенні в таблиці 2.4. [24]

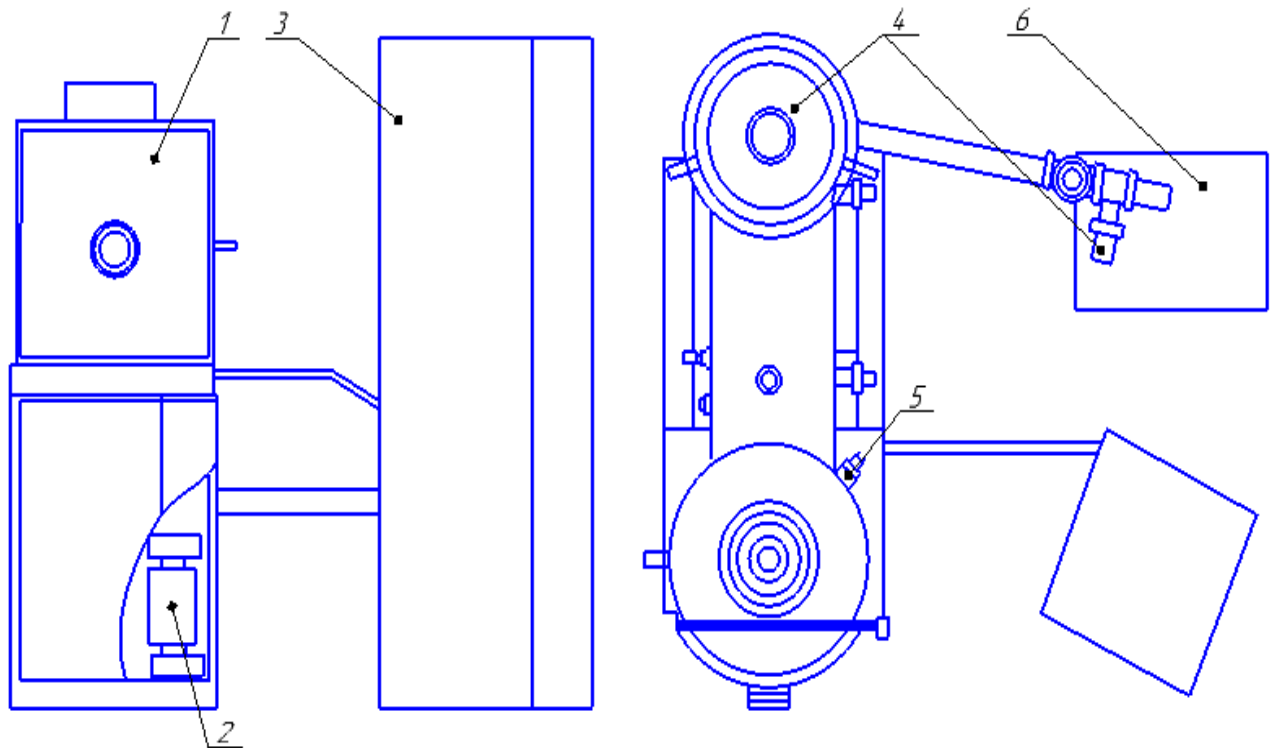


Рисунок 2.2 – Установка УВ – 1Б

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики вакуумної установки ВУ – 1Б [24]

1	Граничний тиск в чистій, пустій і знежиреній камері, при охолодженні її холодною водою, Па	$1.33 \cdot 10^{-3}$
2	Час, за який досягається граничне значення тиску $1.33 \cdot 10^{-3}$ , хв	40
3	Розміри робочої камери: - висота - діаметр	510 600
4	Об'єм робочої камери, м <sup>3</sup>	0,23
5	Граничні розміри оброблюваної деталі: - діаметр; - довжина	60 200
6	Електрична потужність, яку використовує установка в робочу режимі, не більше, кВт	500
7	Тиск стисненого повітря, Па	від $39 \cdot 10^4$ до $49 \cdot 10^4$
8	Кількість дугових випаровувачів, шт	2
9	Швидкість осадження покриття, мкм/год	15-30
10	Мікротвердість покриття, кг/мм <sup>2</sup>	до 2400
11	Струм дуги, А	65 – 130
12	Напруга високовольтного джерела у робочому режимі, В	1200 – 6000
13	Діапазон плавного регулювання опорної напруги низьковольтного джерела, В	0 – 300
14	Максимальний струм підкладки при нормальному режимі, А	10
15	Потужність установки, кВт не більше	8
16	Площа яку займає установка, м <sup>2</sup>	5

Основа вакуумної установки(рис.2.3), складається зі зварного каркасу, в середині якого знаходиться високовольтний трансформатор. Каркас із трьох сторін закриваються дверцятами, для безпеки. Також на каркасі встановлені встановленні мікроперемикачі, які запобігають можливості подачі високої напруги на установку при знятих дверцятах.

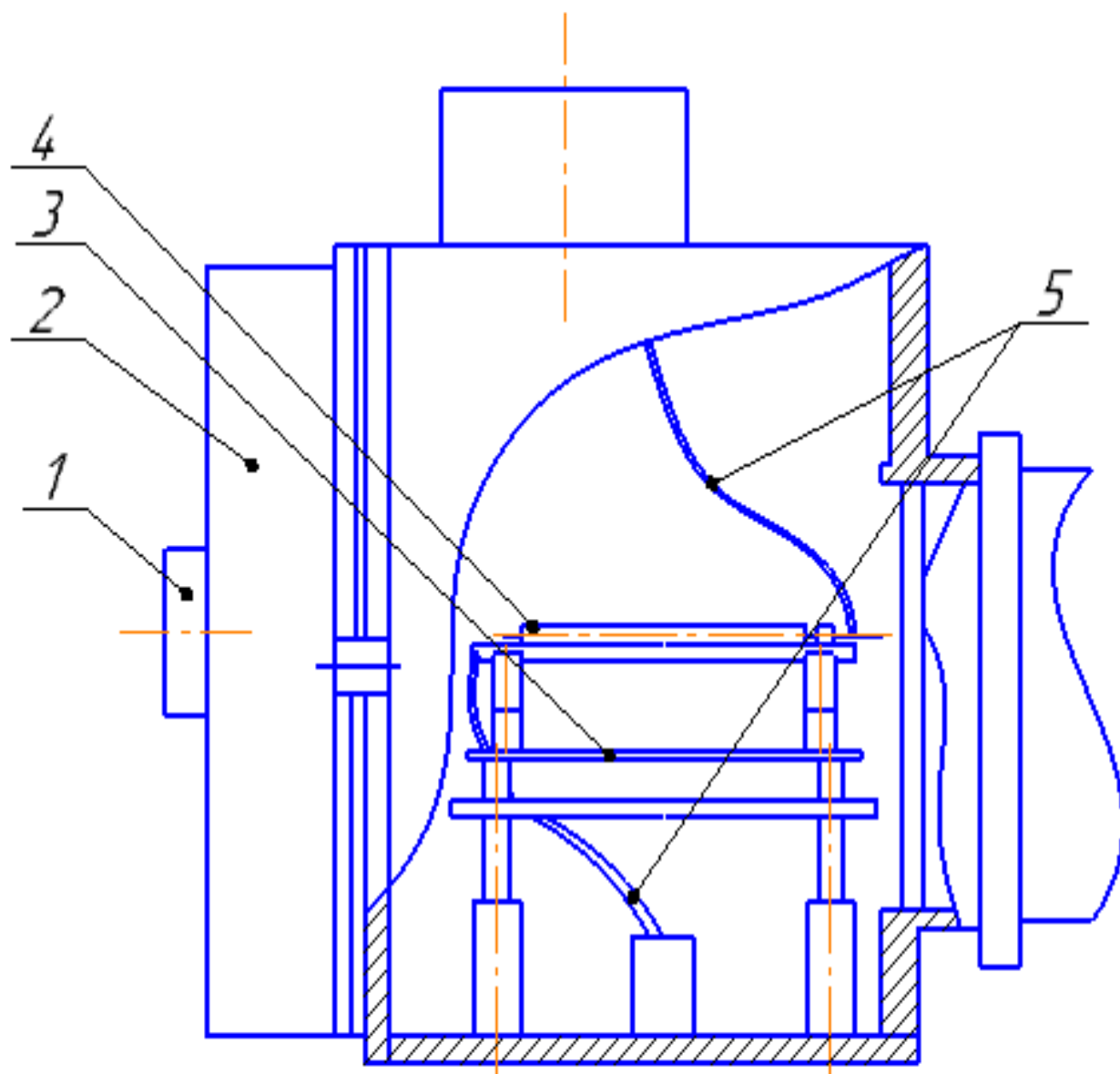


1 – вакуумна камера; 2 – каркас в якому розташоване джерело живлення;  
3 – шафа керування; 4 – система клапанів; 5 – натікач газу; 6 – форвакуумний насос НВПР – 16 – 066

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд вакуумної установки ВУ – 1Б

На верхній площині каркасу знаходиться робоча вакуумна камера, яка з'єднується з високовакуумним затвором. Між камерою и затвором встановлений з'ємний екран типу жалюзі. До високовакуумного затвору під'єднується пневмоклапан, канал для напуску повітря через фільтр осушувач, а також патрубок для підключення форвакуумного насоса АВР – 50.

Вакуумна камера (рис.2.4), приварена до станини. Камера має герметичні двері, поз. 2, що закриваються. На камері встановлений мікроперемикач, який виключає можливість подачі високої напруги в камеру коли відкриті двері. Двері облаштовані оглядовим вікном, поз 1. В камері розташовані: оснастка, поз. 3, деталь, поз. 4, струмопідвідні пластини, поз. 5.



1 – оглядове вікно; 2 – двері камери; 3 – оснастка; 4 – деталь; 5 – струмопідвідні пластини

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд вакуумної камери установки ВУ – 1Б

Для створення дозованого потоку газу и підтримуючого робочого режиму використовується дистанційний голковий натікач НДЗ (рис.2.5).

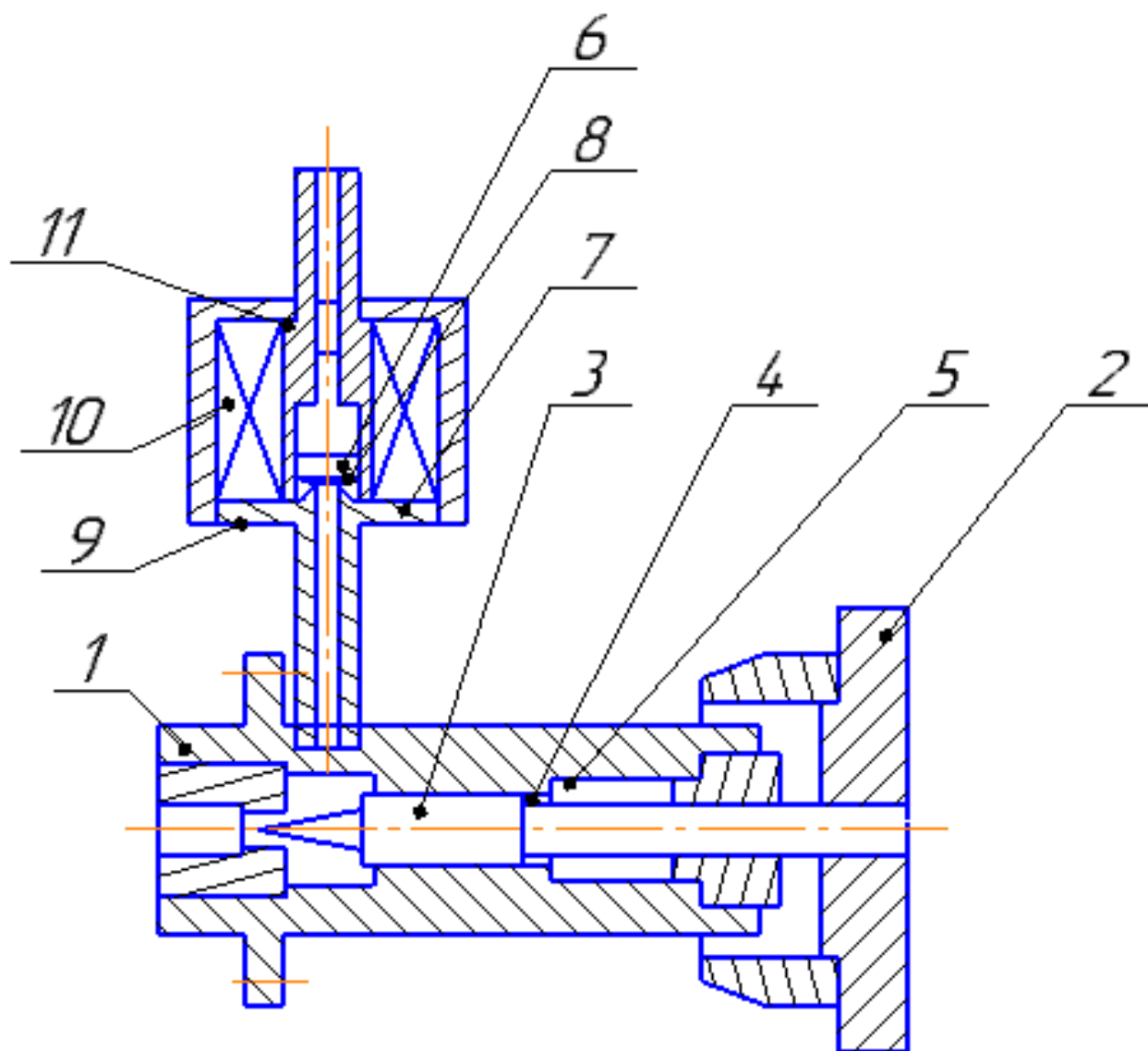
Величина натікаючого газу регулюється зануренням тонкої металевої конічної голки в отвір бронзового сідла, поз. 1. Переміщення голки в отворі відносно осі здійснюється обертанням маховика, поз. 2, і ходового гвинта, поз. 3. Для вакуумного ущільнювача між корпусом и штоком застосована втулка, виготовлена із фторопласту, поз. 4, яка кріпиться до штоку 3 гумовими кільцями, поз. 5.

Плавне регулювання газового потоку досягається зміною зазору між голкою і сідлом.

Дистанційний клапан, поз. 6, призначений для напуску і відсікання потоку регулюючого газу в залежності від встановленого робочого тиску у вакуумній камері. Технічні характеристики натікача наведено в таблиці 2.5. [24]

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики натікачу НДЗ [24]

1	Границі регулювання потоку газу, куб.м.с/Па	$6.6 - 1.3 \cdot 10^8$
2	Габаритні розміри, мм: - висота - довжина - ширина	380 181 84
3	Маса, кг	7.25
4	Споживча потужність, Вт	14
5	Напруга, В	127
6	Напрацювання на відказ, цикли	100
7	Ресурс, цикли	1000



1 – бронзове сидло; 2 – маховик; 3 – ходовий гвинт; 4 – фторопластова трубка; 5 – гумові кільця; 6 – дистанційник клапан; 7 – фланець; 8 – вакуумна резина; 9 – корпус клапана; 10 – котушка

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд газового натікача НДЗ

Для відкачування повітря з камери ми використовуємо форвакуумний насос НВПР – 16 – 066 (рис. 2.6) . Насос призначений для відкачування повітря, хімічно неагресивних газів, парів і парогазових сумішей, попередньо очищених від крапельної вологи та механічних забруднень, в вакуумних установках.



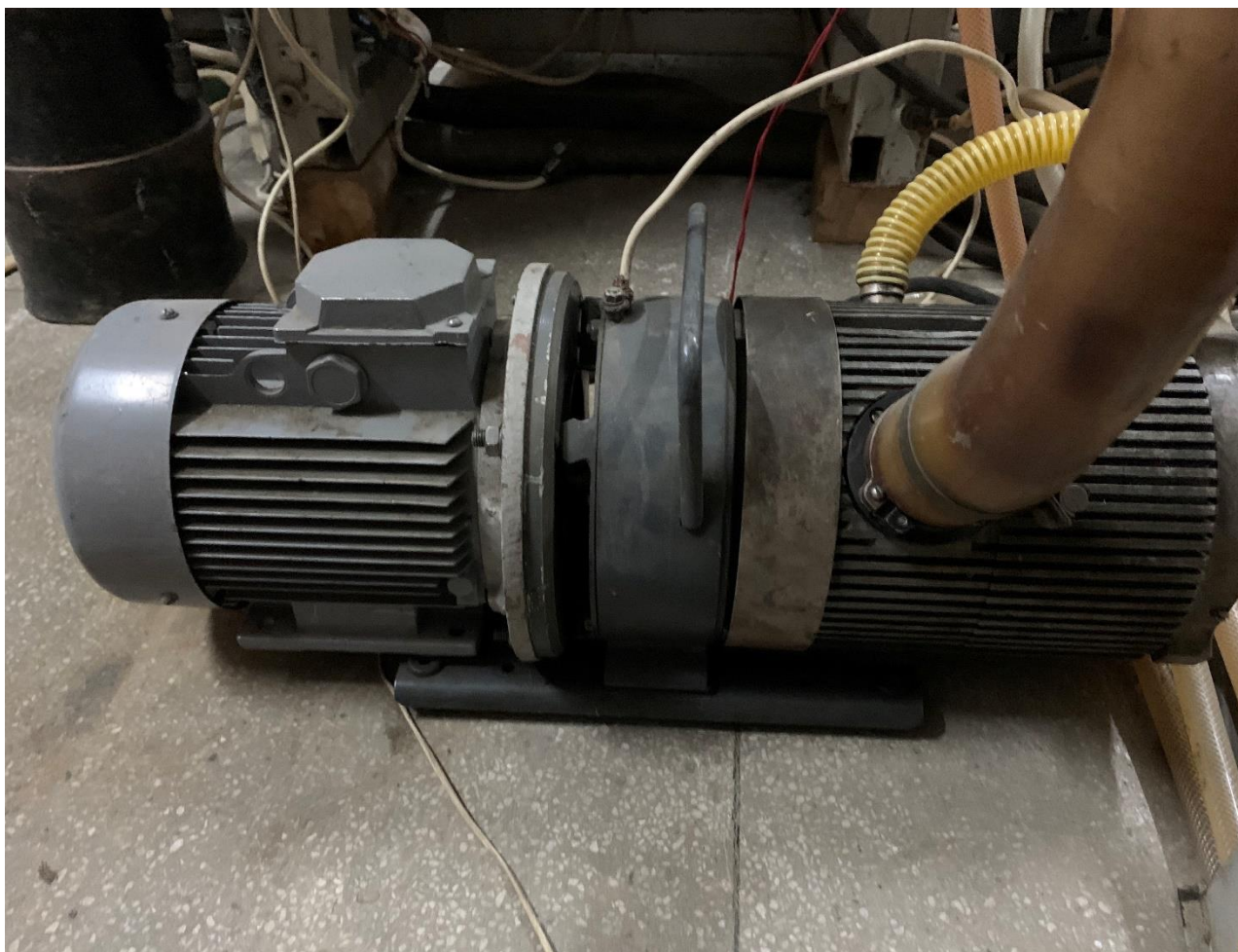


Рисунок 2.6 - Форвакуумний насос НВПР – 16 – 066

Даний насос є двоступеневий пластинчато – роторний, що здійснює відкачування повітря, хімічно неагресивних газів, парів і парогазових сумішей з герметичних обсягів в діапазоні тисків від атмосферного до 0,66 Па ( $5 \times 10^{-3}$  мм рт. ст.). Наявність газобалластного пристрою дозволяє виключити конденсацію парів при їх парціальному тиску на вході насоса до 2000 Па (15 мм рт. Ст.). Мінімальні габаритні розміри насоса і концентрація вузлів регулювання режимів роботи, обслуговування та інформації у фронтальній зоні насоса покращує компонування виробу і його технічне обслуговування. Мінімальна маса допускає транспортування і монтаж насоса без застосування засобів механізації.

Процес відкачування в пластинчато-роторних насосах заснований на механічному всмоктуванні і виштовхуванні газу у наслідок дії періодичної

зміни об'єму робочої камери, утвореним циліндром і рухомими частинами насоса - ротором і лопатками. Технічні характеристики насосу наведені у таблиці 2.6

Таблиця 2.6 - Технічні характеристики насосу НВПР – 16 – 066 [24]

Потужність, к/с	16
Граничний залишковий тиск, Па	
Масло ВМ -1, ВМ – 5	
- без газобаласту	0.66
- з газобаластом	1.33
Масло ВМ – 6	
- без газобаласту	1.33
- з газобаластом	3.9
Кількість масла в насосі, л	1.5
Періодичність заміна масла, год	250
Потужність електродвигуна, кВт	1.5
Габарити насоса, мм	
- довжина	655
- ширина	235
- висота	260
Маса, кг	50

Недоліки. Даний насос не здатний відкачувати наступні речовини:

- вибухонебезпечні;
- отруйні;
- матеріали, що мають здатність роз'їдати поверхню;
- пожежонебезпечні;
- які вступають в реакцію зі змащувальними мастилами.

Крім недоліків даний насос також має ряд переваг серед аналогів:

- ресурс до капітального ремонту від 10 тисяч годин;
- простота в експлуатації;
- стійкість до перепадів напруги і зовнішнім діям;
- мінімальна вага, що дозволяє транспортувати і здійснювати монтаж без допомоги важкого допоміжного обладнання;
- мала витрата мастила;
- компактність.

Для процесу азотування ми використовуємо газоподібний азот особливої чистоти першого сорту ГОСТ 9293-72. Відсоткова відношення азоту ( $N_2$ ) наведені в таблиці 2.7 [24]

Таблиця 2.7 - Відсоткове відношення домішок в азоті [24]

№	Назва показника	Показник у %
1	Об'ємна доля азоту, не менше	99,99
2	Об'ємна доля кисню, не більше	0,0005
3	Об'ємна доля водяної пари в газоподібному азоті, не більше	0,0017
4	Вміст масла в газоподібному азоті	-
5	Вміст механічних включень и вологи	-
6	Об'ємна доля водню, не більше	0,0002
7	Об'ємна частка суми вуглецевмісних включень у перерахуванні на $CH_4$ , не більше	0,0003

Азот - це безбарвний інертний газ, який не має запаху, нетоксичний для людини і навколишнього середовища. Виділяють рідкий азот з повітря, який охолоджують, зріджують і дистиллюють. Технічний газ абсолютно безпечний для навколишнього середовища, він пожежостійкий і не вибухонебезпечний,

тому широко використовується в гірничодобувній промисловості. Добре витісняє кисень, тому застосовується для створення інертного середовища в ємностях. [3]

Дуже часто цей інертний газ застосовують при високотемпературній різанні металів, зварюванні, насиченні.

Для зберігання і транспортування азоту використовується газовий балон ГОСТ 949-73 (рис.2.7). Технічні характеристики балону наведені в таблиці 2.8 [3]

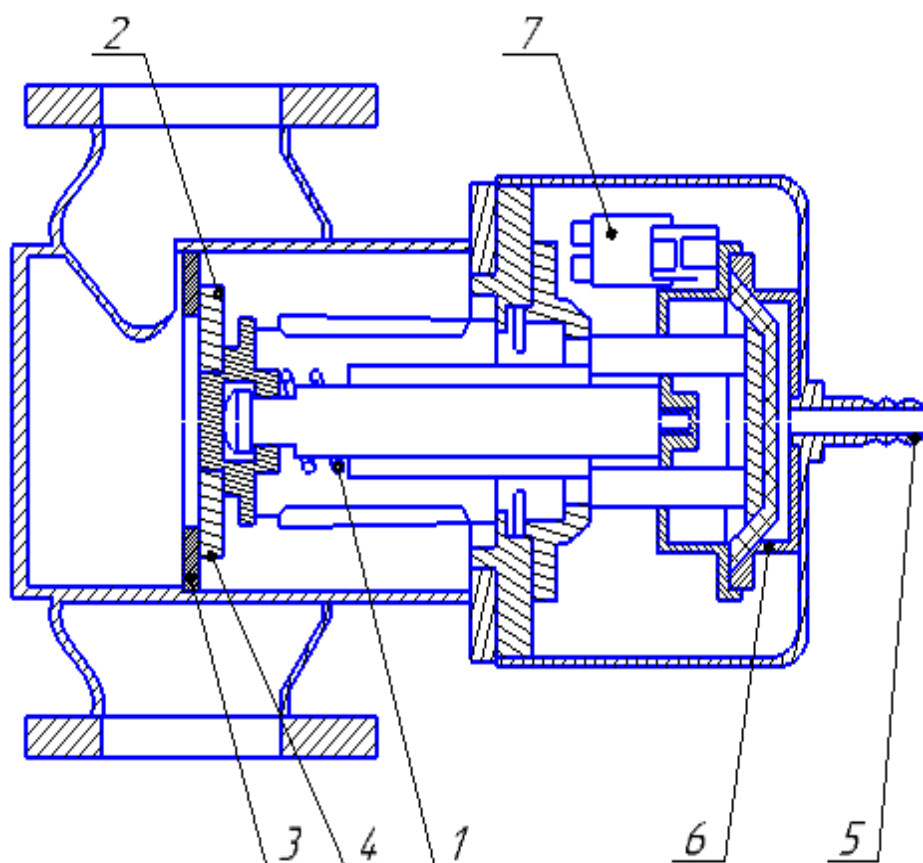


Рисунок 2.7 – Балон з азотом ГОСТ 949-73

Таблиця 2.8 - Технічні характеристики балона для азота [3]

Об'єм, л	12
Матеріал	легована сталь
Марка	12-200Л
Робочий тиск, Мпа	19.6
Діаметр циліндричної частини, мм	140
Маса балону, кг	19.6
Товщина стінки балону, мм	5.7

На даній установці в якості баластного і форвакуумного клапанів застосований клапан з пневмоприводом (рис.2.8).



1 – пружина; 2 – тарілка; 3 – корпус фланцю; 4 – резинова прокладка; 5 – штуцер; 6 – камера; 7 – мікропремикач

Рисунок 2.8 – Загальний вигляд форвакуумного клапана



Клапан знаходиться у нормальному закритому положенні за допомогою пружини, поз. 1, що в свою чергу здавлює тарілку, поз. 2, до корпусу фланцю, поз. 3. Для герметизації клапана слугує резинова прокладка, поз. 4. Даний клапан працює наступним чином. Через штуцер, поз. 5, в камеру, поз. 6, подається стиснене повітря. В цей час камера починає переміщатися, відкриваючи клапан. Для закриття клапана повітря з камери, поз. 6, необхідно викачати в атмосферу. Тарілка, поз. 2, під дією пружини, поз. 1, закріє клапан. Увімкнений мікроперемикач, поз. 7, сигналізує про те, що клапан закритий.

Для подачі в клапан зжатого повітря використовуємо компресор фірми MATARI марки M250B18 – 1 (рис.2.9) [14]



Рисунок 2.9 – Компресор фірми MATARI марки M250B18 – 1 [14]

Технічні характеристики компресора наведені в таблиці 2.9 [14].

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики компресора фірми MATARI марки M250B18 – 1 [14]

Різновид	Поршневий
Тип	Масляний
Привод	Прямий
Напруга мережі, В	220
Тиск, Бар	10
Продуктивність, л/хв	320
Об'єм ресивера, л	50
Кількість циліндрів	1
Кількість ступенів стиснення, ступінь	1
Потужність двигуна, кВт	1.8
Частота, Гц	50
Продуктивність на виході, л/хв	250
Кількість вихідних коннкторів, шт	2
Рівень шуму, дБ	71
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	780
- ширина	280
- висота	670
Вага, кг	31

В якості джерела живлення (рис.2.10), ми використовували саморобний однофазний трансформатор, що підвищує напругу. Трансформатор, це силова установка, яка підвищує або знижує напругу змінного струму.

Основою роботи трансформатора є механізм електромагнітної індукції. Металевий сердечник знаходиться в ізольованому середовищі. До схеми

підключається дві котушки, кількість обмоток неоднакова. Для того щоб збільшити напругу, в первинному контурі котушки має бути більше витків ніж у вторинному контурі. Технічні характеристики трансформатора наведені в таблиці 2.10.

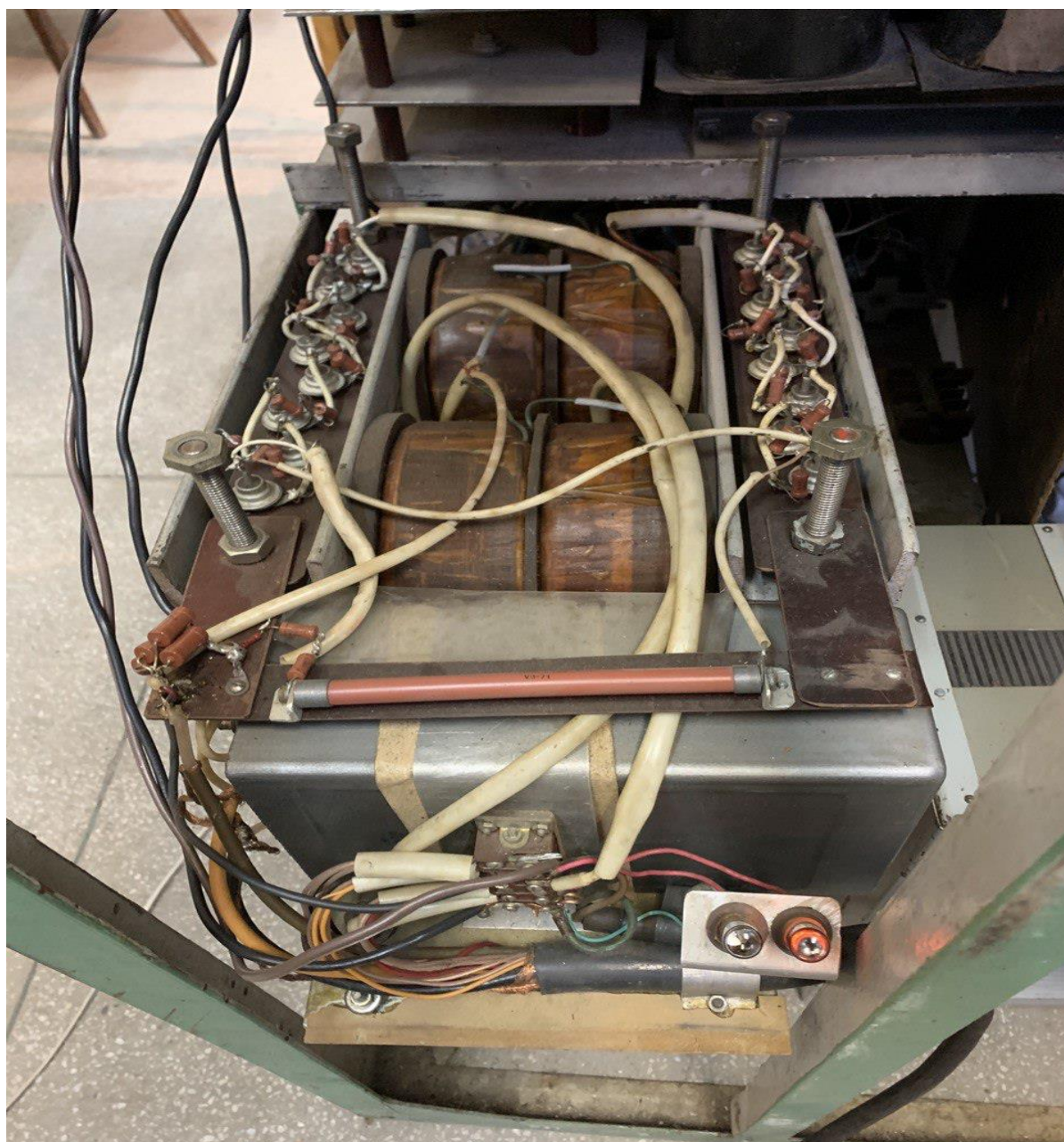


Рисунок 2.10 – Однофазний трансформатор для підвищення напруги



Таблиця 2.10 - Технічні характеристики трансформатора

Номінальна первинна напруга, В	167
Номінальна вторинна напруга, кВ	35
Найбільша вторинна напруга, кВ	46
Випробувальна напруга на протязі 1хв, кВ	52.5
Номінальна потужність, кВ*А	1.5
Маса, не більше, кг	50
Короткочасна потужність на протязі 2 хвилин при ПВ 20%, кВ*А	5
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	341
- ширина	416
- висота	484

Для виміру робочого тиску в камері ми використовуємо термоелектричний вакууметр 13ВТЗ – 003 (рис.2.11).

Даний вакууметр призначений для роботи в автоматизованих системах вакуума в якості датчика, а також для індикації та виміру тиску повітря і інших газів в діапазоні  $1 \cdot 10^1 \dots 1 \cdot 10^5$  Па. Перевагою даного пристрою є те, що робочий діапазон задовольняє наші потреби для відстеження тиску в колбі на всіх стадіях відкачування. Від масляного манометра він відрізняється тим, що має малу інерційність, а від цифрового тим, що має високу надійність датчика і широкий діапазон вимірювальних тисків. Також даний вакууметр має можливість працювати в якості вакуумного реле, що дає змогу вимикати або вмикати зовнішні пристрої після досягнення встановлених значень вимірювального тиску.



Рисунок 2.11 – Термоелектричний вакууметр 13BT3 – 003

Для генерації імпульсів використовується генератор імпульсів Г5 – 54 (рис.2.12). [5]

Основна задача даного генератора, як і в моделях аналогів, полягає у створенні електромагнітних сигналів. Даний прилад створює сигнал певної форми та частоти. Генератор Г5 – 54 рекомендується використовувати лише в лабораторних умовах, виключаючи його експлуатації в екстримальних кліматичних умовах. Технічні характеристики генератора наведені в таблиці 2.11. [14]



Рисунок 2.12 – Генератор імпульсів Г5 – 54

Таблица 2.11 - Технические характеристики генератора импульсов Г5 – 54[14]

Частота (период) повторения	0.01 Гц – 100 кГц
Похибка установки частоты	0.1 F
Максимальная амплитуда импульсов	50 В (500 Ом)
Похибка установки амплитуды	0.1 U + Kx1 В
Тривалість імпульса	0.1 – 1000 мкс
Нерівномірність вершини імпульса і початкового рівня в паузі між імпульсами	Менше 5%
Тимчасовий зсув основного імпульса відносно синхроімпульса	0 – 1000 мкс
Споживча потужність	50 В*А
Габаритні розміри:	мм
- довжина	370
- висота	227
- ширина	185
Маса	6 кг

Для вимірювання температури деталі під час процесу ми використовували односпайну термопару та мультиметр фірми UNI – T марки M838 (рис.2.13). [5]

Термопарою називають тепловий датчик, який передає напругу електричного струму, який залежить від температури. Перевагою термопар є те, що за допомогою неї можливо вимірювати широкий діапазон температур, спай термопар може бути ізольованим або заземленим, надійність і міцність конструкції, простота виготовлення.

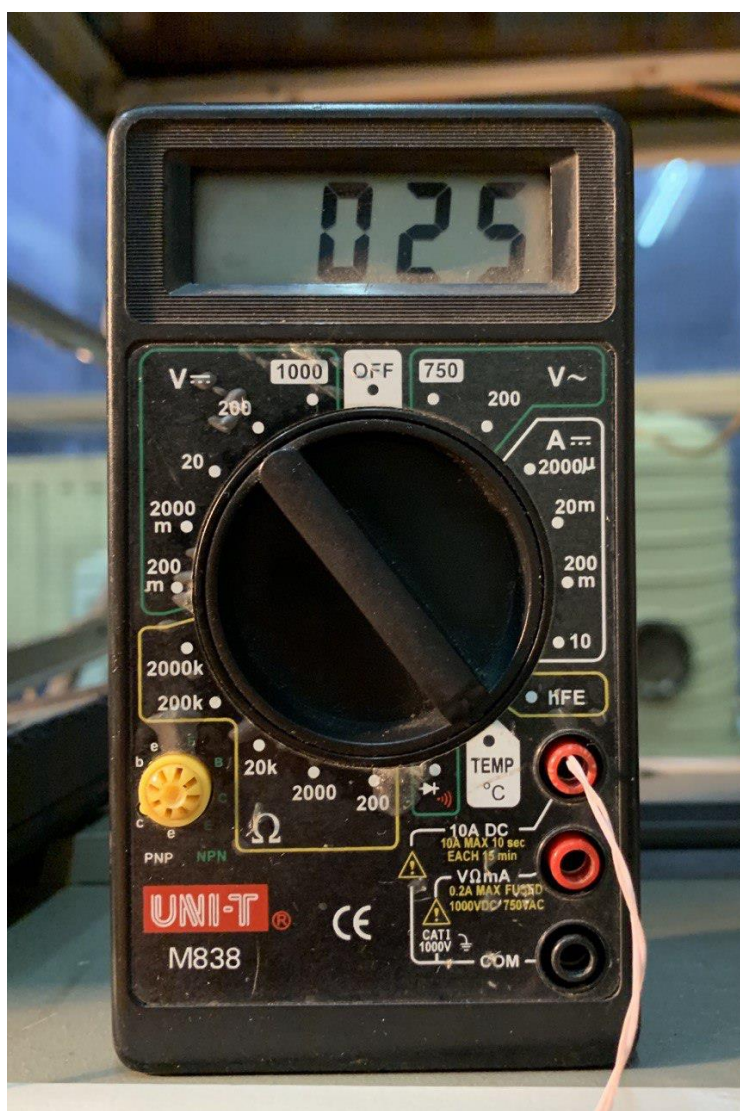


Рисунок 2.13 – Мультиметр фірми UNI – T марки M838

Для зчитування інформації з термопари використовують мультиметр. Цифровий мультиметр М838 призначений для виміру сили постійного і змінного струму, опору, величин постійних і змінних напруг, температури. Характеристики мультиметра наведені в таблиці 2.12. [5]

Таблиця 2.12 - Технічні характеристики мультиметра М838[5]

Кількість вимірів в секунду	2
Постійна напруга	$U = 0,1\text{мВ} - 1000\text{В}$
Змінна напруга	$U \sim 0.1\text{В} - 750\text{В}$
Постійний струм	$I = 2\text{мА} - 10\text{А}$
Діапазон частот змінного струму	40 – 400Гц
Опір	$R = 0.1\text{Ом} - 2\text{Мом}$
Вхідний опір	$R = 1\text{Мом}$
Температура	$t^{\circ}\text{C} = -20 - +1370$
Режим прозвону	$< 1\text{кОм}$
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	65
- висота	125
- ширина	28
Вага, гр	180

Для регулювання електричного струму та підсилення електричного струму ми використовуємо електронний ключ з п'ятиелектродною лампою, що зветься пентод ГУ - 81 (рис.2.14). Пентоди здатні досягти коефіцієнт підсилення до тисячі разів. [17]

Дане явище пояснюється тим, що захисна сітка виконує роль допоміжної екрануючої сітки. З цього слідує, що в пентоді дія аноду в порівнянні з дією



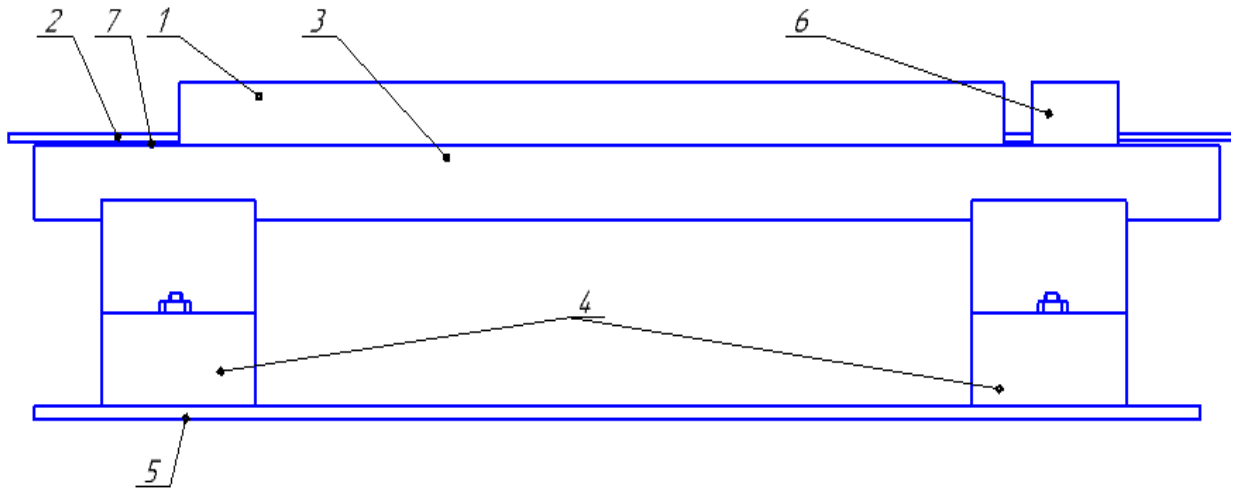
керуючої сітки ще слабша. Це означає, що внутрішній опір буде зростати, що в деяких пентодів становить мільйон Ом. [17]



Рисунок 2.14 – П'ятиелектродна лампа пентод

Спеціально для дослідів було розроблено оснастку (рис.2.15). До металевої платформи, поз. 5, прикручуються керамічні підставки, поз.4. Головна задача цих підкладок полягає в тому, щоб ізолювати деталь від вакуумної камери, а також для того, щоб плазма горіла між електродом і

деталлю. На керамічні підставки кріпиться кутник, поз. 3. Це робиться для того, щоб під час процесу азотування деталь надійно була закріплена. Також вона допомагає у відцентруванні електроду відносно деталі.



1 – деталь; 2 – електрод; 3 – кутник; 4 – керамічні підставки; 5 – платформа; 6 – фторопластовий циліндр; 7 – керамічна підставка

Рисунок 2.15 – Загальний вигляд оснастки

Далі встановлюємо електрод, поз. 2, який надійно закріплений у фторопластовому циліндрі, поз. 6. Щоб відцентрувати електрод відносно деталі, на токарному станку виточуємо фторопластовий циліндр діаметр якого повинен співпадати з діаметром деталі. Наступною операцією буде свердління отвору у центрі циліндра. Цей отвір призначений для електроду, який повинен заходити туди з натягом. Далі на підставку встановлюється деталь, поз. 1. Для підтримування електроду у центрі деталі, з іншої сторони ми використовуємо циліндричну, керамічну підставку, поз. 7. Керамічна підставка, поз. 7, повинна вільно крутитися. Це пов'язано з тим, що під час процесу азотування, електрод нагрівається, що призводить до його лінійного збільшення. Якщо кінці електроду з обох сторін будуть нерухомо закріплені, то під час процесу

електрод буде прогинатися. А це означає, що відстань від електрода до деталі буде різної, що негативно вплине на технологічний процес.

Для азотування ми використовуємо молібденовий електрод ГОСТ 27266 – 87 діаметром 2 мм. Хімічний склад електроду наведено в таблиці 2.13. [21]

Таблиця 2.13 - Хімічний склад у % електроду ГОСТ 27266 – 87 [21]

Mo	C	Si	Ni	Al	Ca	Mg	O	Fe
мін.	до	до	до	до	до	до	до	до
99.96	0.005	0.01	0.005	0.004	0.003	0.002	0.008	0.01



## **3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕРМО-ХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **3.1 Розробка технологічного процесу**

В технологічному процесі описані устаткування, підготовка поверхні деталі та оснастки перед обробкою, режим хіміко-термічної обробки.

#### **3.1.1 Підготовка деталі**

Для повного контролювання процесу нам потрібно слідкувати за всіма параметрами процесу. Важливу роль у процесі відіграє температура деталі. Якщо не слідкувати за цим показником, то можливо два випадка:

- 1- деталь нагріється вище 500 °С, що призведе до зменшення твердості поверхні і недоцільності використання даного методу обробки;
- 2- деталь буде мати температуру < 250 – 300 °С, а це призведе до того, що дифузія атомів азоту в метал не відбудеться.

Щоб уникнути цих випадків, нам потрібно встановити термopари на деталі. Для цього ми свердлимо 3 отвори на глибину 7мм. Отвори потрібно свердлити по краям та середині зразка, щоб повністю контролювати температурний діапазон. Також термopара, яка буде встановлена найдалше від оглядового вікна буде показувати нам, чи процес азотування відбувається по всій довжині отвору.

### 3.1.2 Очищення деталі та оснастки

Перед тим як встановити деталь в оснастку, потрібно ретельно протерти поверхню, що азотується, технічним етиловим спиртом ГОСТ 18300 – 87. Вміст спирту не менше 92%. Поверхню потрібно протирати до металевого блиску. Також протирається оснастка. Особливо ті місця, де деталь дотикається до кутника.

### 3.1.3 Підготовка оснастки

Перший етап – це встановлення електроду у фторопластовий циліндр. Після того як ми встановили електрод і переконались, що електрод міцно закріплений, встановлюємо його на кутник і закріплюємо хомутом (рис.3.1).

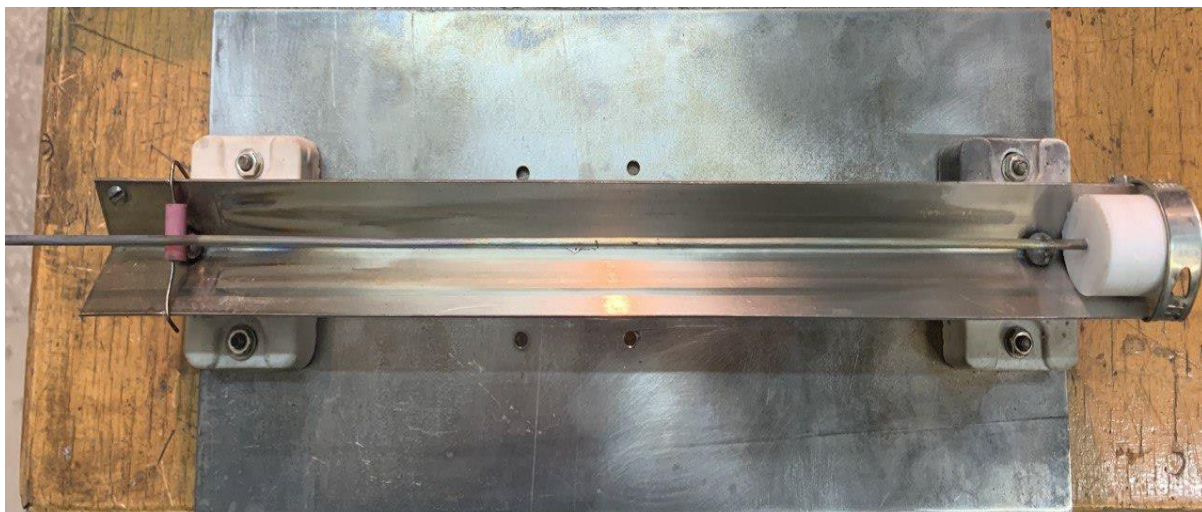


Рисунок 3.1 – Закріплення електроду до платформи

### 3.1.4 Закріплення деталі

Після того, як ми встановили електрод, нам потрібно розмістити деталь на кутнику. З вільного кінця оснастки одягаєм деталь на електрод. Під час розміщення деталі потрібно уникати контакту електрода і внутрішньої поверхні деталі. Тому що електрод може пошкодити поверхню, що може вплинути на дослід (рис.3.2).

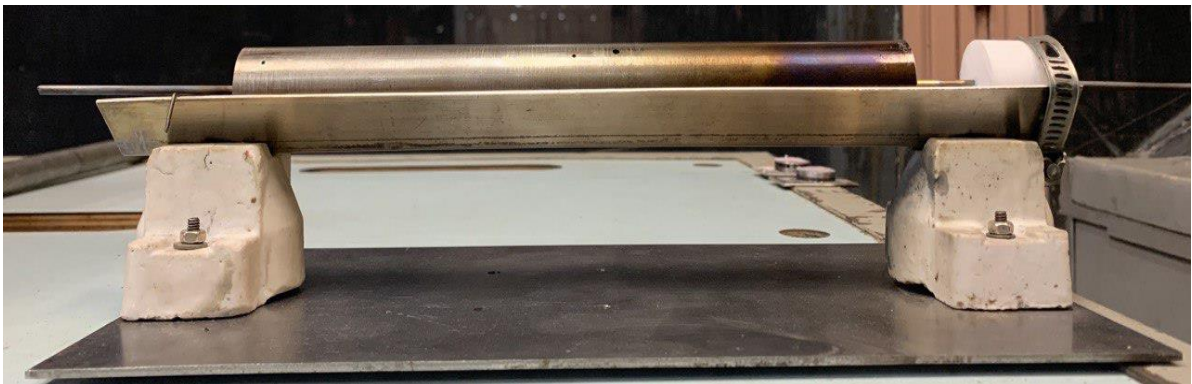


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд оснастки та деталі

### 3.1.5 Підготовка вакуумної камери

Процес іонного азотування триває від 6 до 12 годин. У весь цей час вакуумна камера повинна тримати робочий тиск в діапазоні 150 – 400 Па. Для цього перед її використанням потрібно провести дослід, щоб виявити придатність даної камери для проведення даного процесу.

У ході експерименту ми досліджували зміни тиску камери від часу. Для цього з камери ми відкачуємо повітря і створюємо тиск 50 Па. Після чого вимикаємо форвакуумний насос і кожну годину записуємо показники

вакуумметра. Дослід проходив на протязі 13 годин. По даним, які ми отримали у ході експерименту, ми побудували графік (рис.3.1), який показує залежність тиску у вакуумній камері від часу.

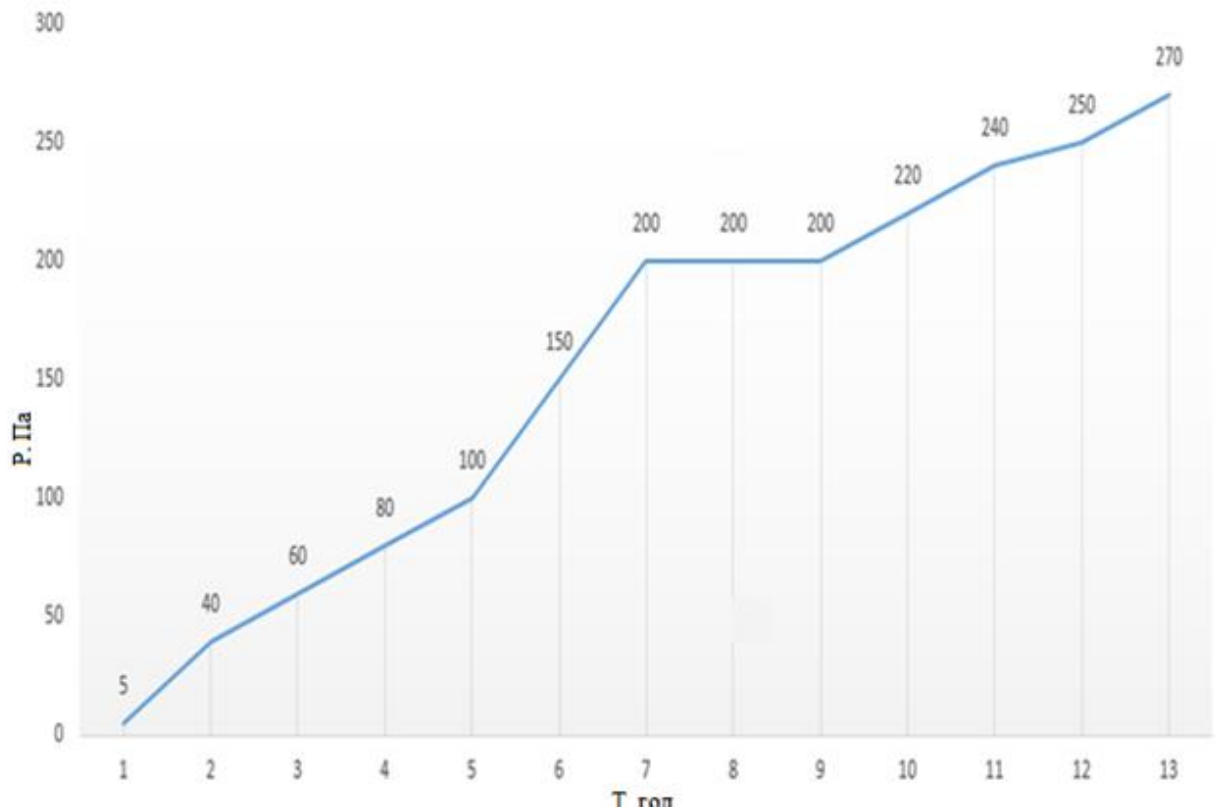


Рисунок 3.3 – Графік залежності тиску в вакуумній камері від часу

Проаналізувавши графік, можна зробити висновок, що робочий тиск в камері зберігається на протязі 13 – 14 годин. А ці умови повністю задовольняють вимогу до процесу.

Перед встановленням оснастки потрібно ретельно перевірити камера на наявність сторонніх предметів. Якщо такі виявлено потрібно прибрати їх за допомогою ганчірки. Також рекомендується протерти робочу камеру сухою ганчіркою перед використанням.

### 3.1.6 Розміщення деталі у камеру

Розміщуємо оснастку у вакуумну камеру ставлячи її на опори, що знаходяться в камері. Після встановлення потрібно переконатися, що платформа, на якій стоїть деталь, знаходиться паралельно відносно підлоги камери. Також перевіряємо розміщення електроду відносно деталі (рис.3.4).



Рисунок 3.4 – Розміщення оснастки у вакуумній камері

Далі перевіряємо ізоляцію між деталлю і робочою камерою за допомогою мультиметру, який описаний у розділі 3. Це робиться для того, щоб уникнути небезпечних випадків. Якщо між камерою і деталлю буде контакт,



то під час проведення процесу камера буде знаходитися під напругою. Це може призвести до ураження електричним струмом.

### 3.1.7 Перевірка та встановлення термопар

Для перевірки термопарі потрібно звести 3 кінці разом і піднести до джерела тепла. Після чого потрібно звірити дані на всіх 3 мультиметрах. Після того як переконались, що термопарі відкалібровані, встановлюємо їх у відповідні отвори (рис.3.5)

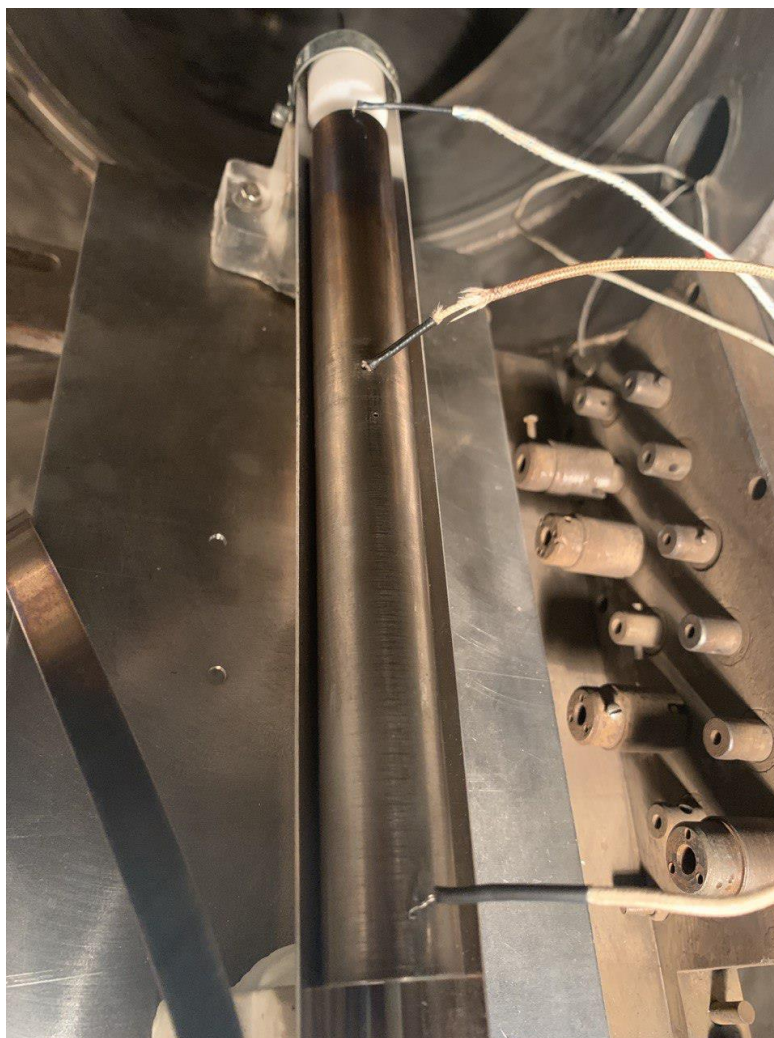


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд розміщення термопар

### **3.1.8 Відкачування повітря з камери**

Після того як встановили оснастку з деталлю в камеру, а також під'єднали електроди і термопару, закриваємо камеру, та відкачуємо повітря. Спочатку потрібно увімкнути установку, та перевірити клапан, який відповідає за напуск повітря у камери, він має бути перекритим. Далі включаєм форвакуумний насос, чекаємо доки компресор накачає повітря, яке буде відкривати клапан. Далі відкриваємо клапан для відкачування. Створюємо тиск в камері 50 Па. Тиск міряємо за допомогою термоелектричного вакуумметра. Після того як ми досягли необхідного тиску, перекриваємо клапан та виключаємо насос.

### **3.1.9 Відкачування повітря з камери**

Після відкачування повітря, потрібно продути камеру азотом. Для цього спочатку відкриваємо редуктор на балоні з азотом. Після редуктора відкриваєм натікач газу та створюємо тиск у камері 400 Па. Далі перекриваємо натікач, та знову відкачуємо камеру до тиску 50 Па (див. пункт 3.1.1). Після досягнення тиску в 50Па знову відкриваємо натікач і створюємо робочий тиск 200Па. Продувка камери робиться для того, щоб збільшити концентрацію азоту в камері, а також для полегшення горіння плазми.

### 3.1.10 Відкачування повітря з камери

Після створення робочого тиску в камері, вмикаємо трансформатор, електронний ключ, генератор частот, та виставляємо параметри які наведені в таблиці 3.1

Після встановлення робочого режиму в камері повинна загорітися плазма. Вона має характерний колір горіння (рис.3.6).

Таблиця 3.1– Параметри процесу азотування

Частота імпульсів $f_0$ , кГц	10
Тиск в робочій камері, Па	250
Напруга $U$ , кВ	1.5
Тривалість процесу, год	8
Струм, що подається на пентод, мА	10
Скважність, $Q$	3.5



Рисунок 3.6 – Процес горіння плазми



Розберемо кожен параметр окремо. При розгляді літератури та у ході проведення експериментів було обрана напруга 1.5 кВ. Це пов'язано з тим, що при менших напругах не відбувається процес азотування. Також дана напруга задовольняє наш діапазон температур, до якого ми можемо розігріти деталь. Зі збільшенням напруги збільшується температура деталі. Це може призвести до структурних перетворень на поверхні деталі. Це явище можливо компенсувати зниженням тиску у вакуумній камері, але це приведе до наступних наслідків.

Якщо розпочати процес азотування при тиску в 100 Па, то при малому вмісті азоту в камері почнуть утворюватися дугові розряди між деталлю, електродом та оснасткою (рис.3.7). Це призводить до псування поверхні виробу. Також при такому тиску не відбувається процес дифузії азоту в деталь. Це відбувається за рахунок того, що при малому тиску відсутній газ-провідник, який буде передавати і у даному випадку тепло передається за допомогою радіації.

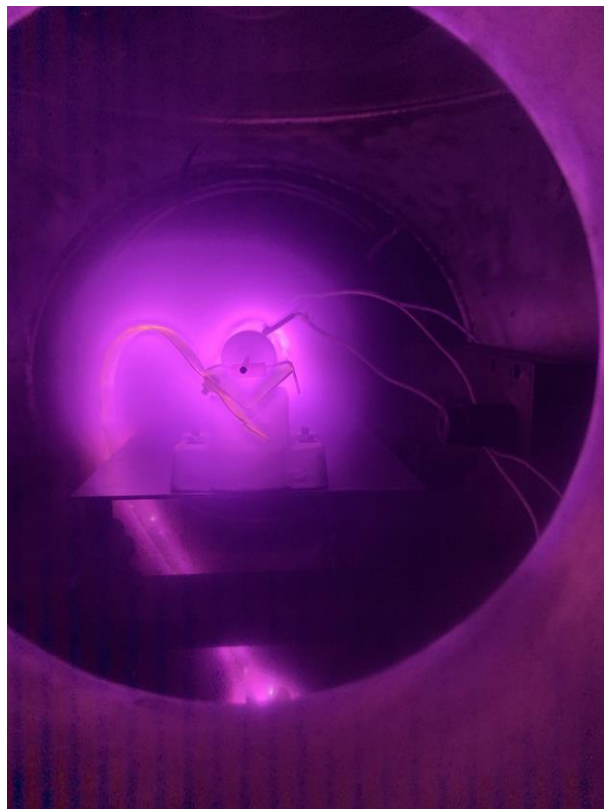


Рисунок 3.7 – Горіння плазми при низькому робочому тиску

Також азотування повинно проводитися по всій довжині виробу. Це можливо спостерігати як візуально (рис. 3.7), але часом це дуже важко, так і за допомогою термопари. Якщо процес проходить по всій довжині виробу то різниця температур між термопарами буде в діапазоні 5 - 10 градусів.

Для нашого процесу, ми виставляємо скважність імпульсу 3.5, яка прямо пропорційна частоті. При меншій скважності процес відбувається не на всю довжину деталі. Це можливо компенсувати збільшенням напруги, але це приводить до інших наслідків. Ці наслідки наведені вище. При високому значенні скважності, деталь може перегріватися, що може призвести до структурних перетворень.

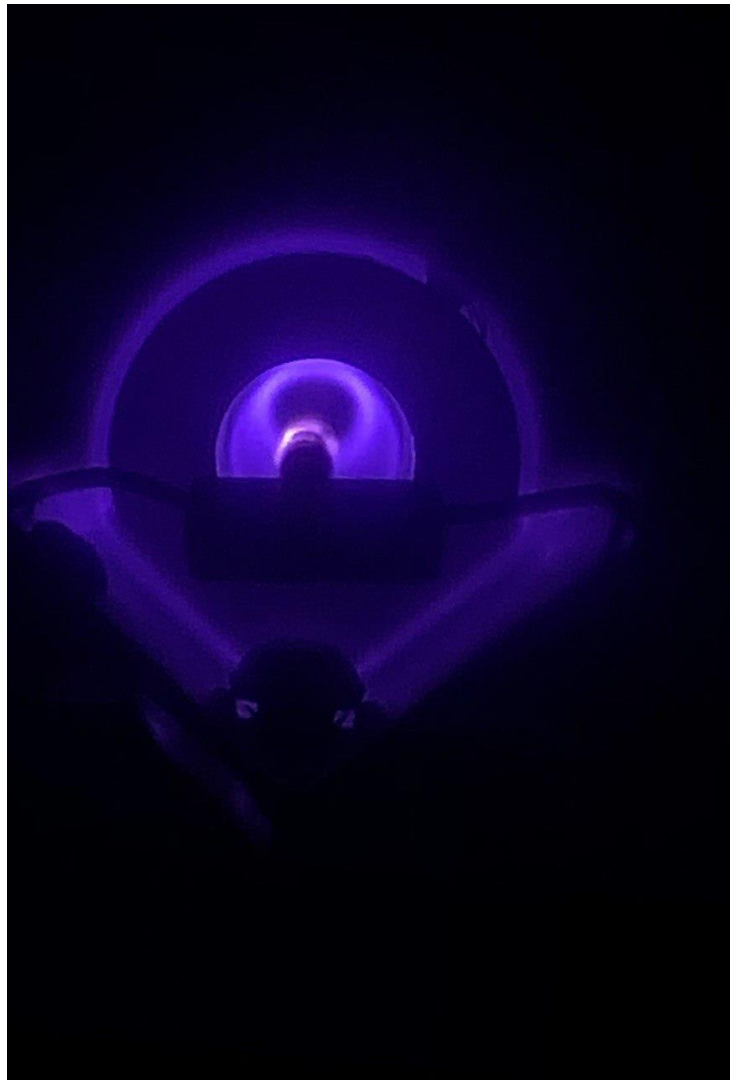


Рисунок 3.8 – Азотування по всій довжині деталі

На рисунку 3.8 ми можемо побачити, що азотування відбувається по всій довжині. Це підтверджується тим, що ми бачимо задню кромку нашої деталі, а також на протязі всієї довжини відсутня темна область, яка свідчить про відсутність процесу азотування.

### **3.1.11 Завершення процесу**

Після завершення процесу азотування робимо наступні дії:

- вимкнути електронний ключ;
- вимкнути трансформатор;
- перекрити натікач;
- перекрити редуктор на балоні;
- вимкнути установку.

Охолодження деталі повинно відбуватися в середовищі в якому проходило азотування. Охолоджуємо деталь до 50 °С. Після чого напускаємо повітря в камеру і дістаємо нашу деталь для проведення дослідів.

## **3.2 Проведення досліджень**

### **3.2.1 Відрізання зразків**

Після того як деталь охолола і її дістали з камери, потрібно відрізати зразки для дослідження. Для цього відрізаємо 3 зразки у вигляді шайби довжиною 5-10мм, два зразка з різних кінців, та один по-середині. Різання повинно проводитись за допомогою ручної пилки. Якщо використовувати болгарку, чи інші засоби різання при використанні яких у зоні різання під час тертя виникає висока температура, це може призвести до структурних перетворень покриття, а також до завалювання країв. Після завалювання країв неможливо проводити наступні досліди, тому що показники твердості у тій зоні будуть не вірними.

### **3.2.2 Ізоляція внутрішньої поверхні**

Щоб уникнути пошкодження та завалювання країв у подальшій обробці потрібно ізолювати оброблену поверхню. Для цієї операції ми застосовуємо самотвердіючу пластмасу «ПРОТАКРИЛ – М» [10]. Перед заливання пластмаси внутрішню поверхню потрібно очистити від металевої стружки та бруду, після чого протерти спиртом для знежирення. Після чого заливаємо розчин, та залишаємо зразок на 7 – 8 годин для повного застигання пластмаси.

### 3.2.3 Шліфування поверхні

Після ізоляції поверхні, наступною операцією є шліфування (рис.3.9). Шліфування потрібно виконувати для подальшого проведення дослідів структури та міцності. Якщо поверхню не шліфувати до дзеркального блиску, а залишити на поверхні подряпини, то під час проведення дослідів на міцність, дані будуть не коректні. Шліфування відбувається у декілька етапів.



Рисунок 3.9 – Зразки до (праворуч) та після (ліворуч) шліфування

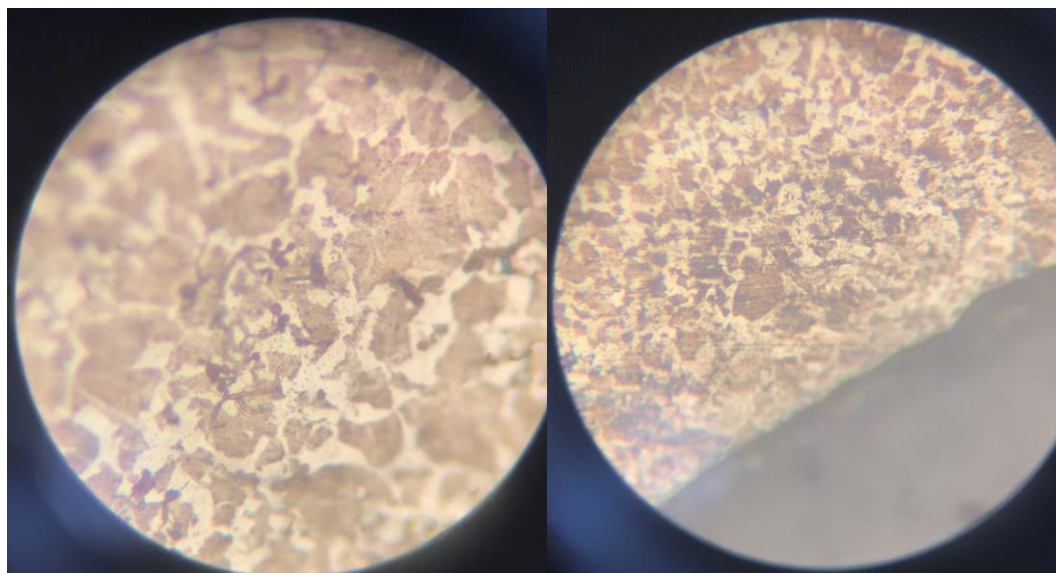
Для шліфування використовуємо скло, на яке стелиться наждаковий папір. Спочатку використовуємо папір зернистістю 240, для зняття затверділої пластмаси з поверхні заготовки. Після зняття пластмаси кладемо новий пір на скло із зернистістю 80 для зняття рисок після дряпання. Після зняття рисок, знову міняємо папір на зернистість 40 і шліфуємо поверхню до дзеркального блиску. Шліфування потрібно проводити поступовими рухами вперед – назад. Також з часом потрібно змінювати положення заготовки. [10]

### 3.2.4 Травлення поверхні

Для травлення поверхні використовуємо 5% розчин азотної кислоти. Для травлення поверхні потрібно за допомогою ватної палички нанести розчин на потрібну ділянку поверхні. Розчин тримати 1-2 секунди, після чого змити дистильованою водою, та протерти місце травлення паперовою серветкою.

### 3.2.5 Дослідження мікроструктури

Після хімічного травлення проводимо дослідження мікроструктури. Для цього використовуємо мікроскоп.



а)

б)

а) – структура не обробленої зони; б) – структура обробленої зони

Рисунок 3.10 – Структура зразка до та після азотування



На рисунку 3.10 видно, що структура оброблювальної і необроблювальної поверхні однакові. Це нам показує те, що процес проходив стабільно і перегріву деталі не відбулося.

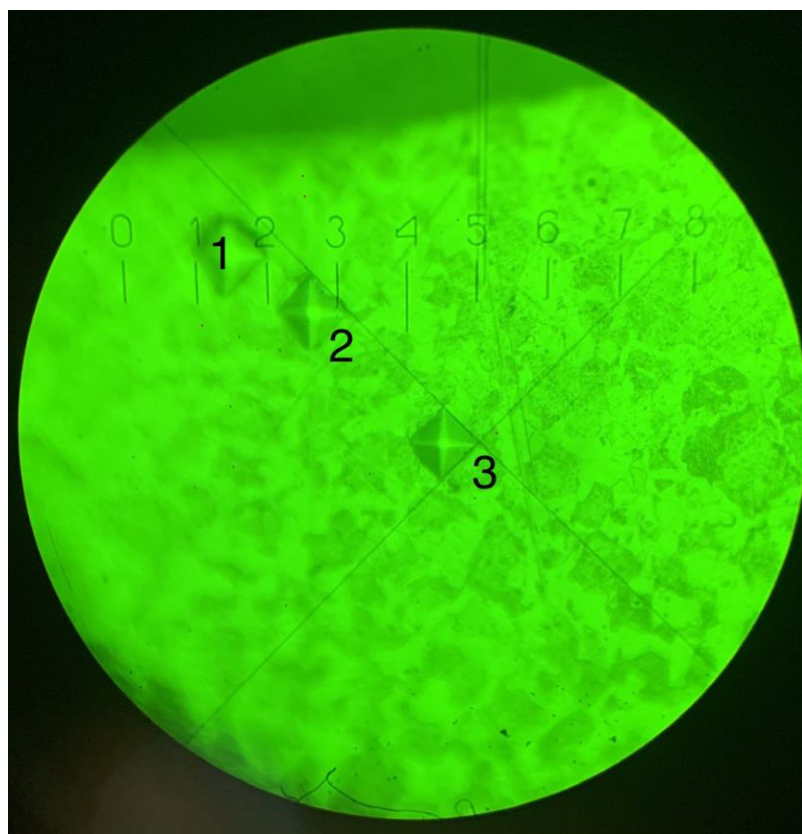
### 3.2.6 Дослідження на твердість

Для дослідження на твердість ми використовуємо прилад ПМТ – 3 (рис.3.11) [17]



Рисунок 3.11 – Прилад для вимірювання мікротвердості ПМТ – 3[17]

Принцип дії полягає у вдавлюванні індентора у вигляді алмазної піраміди у зразок. Після чого, за допомогою розмітки на окулярі лінзи ми виміряємо діагональ відбитка та через таблицю переводимо у ГПа. На рисунку 3.12 зображено зони відбитку індентора [17], графік залежності твердості покриття від глибини азотування зображений на рисунку 3.13



Твердість: 1 - 21.4 ГПа; 2 – 18.9 ГПа; 3 – 17.8 ГПа

Рисунок 3.12 – Зони відбитку індентора



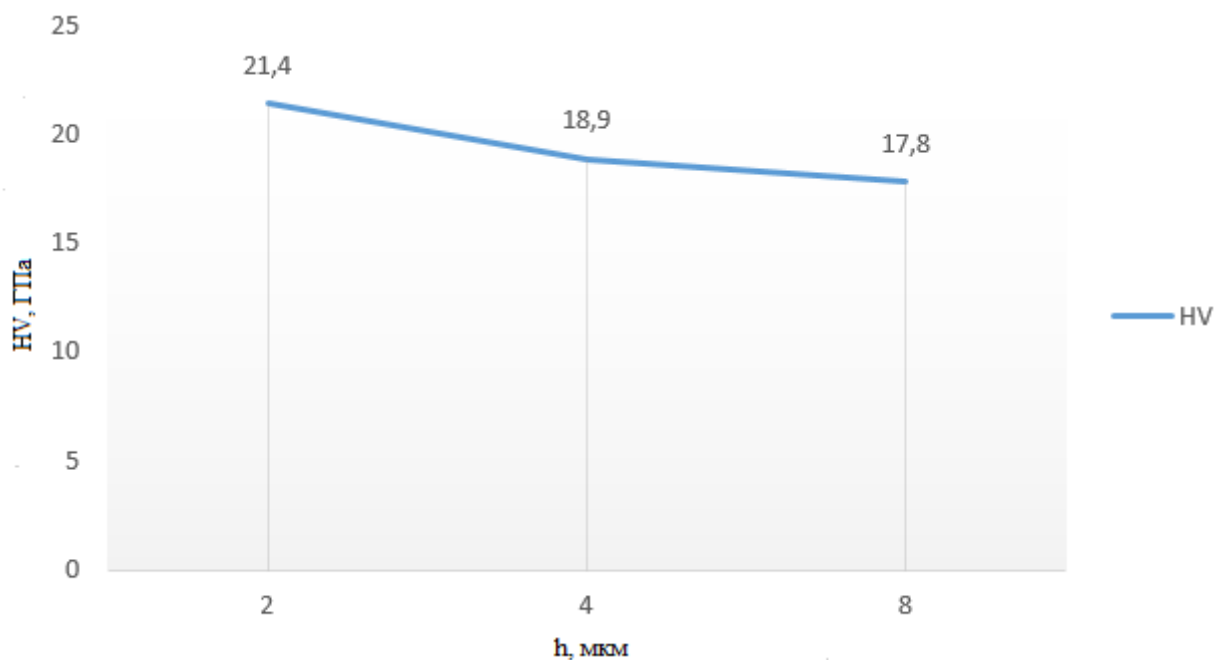


Рисунок 3.13 – Графік залежності твердості покриття від глибини азотування зразка зі сталі 18ХГТ, тривалість процесу 8 год

Інтервал між уколами повинен бути не менше ніж один відбиток. Це пов'язано з тим, що після відбитка, зона навколо нього деформується, що призводить до її зміцнення.

На графіку видно, що чим далі зони обробки матеріалу, тим твердість стає меншою. Із даного графіка можливо взяти інформацію для режимів у подальших дослідях.

### 3.3 Висновок

У даному розділі було запропоновано технологію термо-хімічної обробки внутрішньої поверхні циліндричної деталі за допомогою іонного азотування у плазмі тліючого розряду.

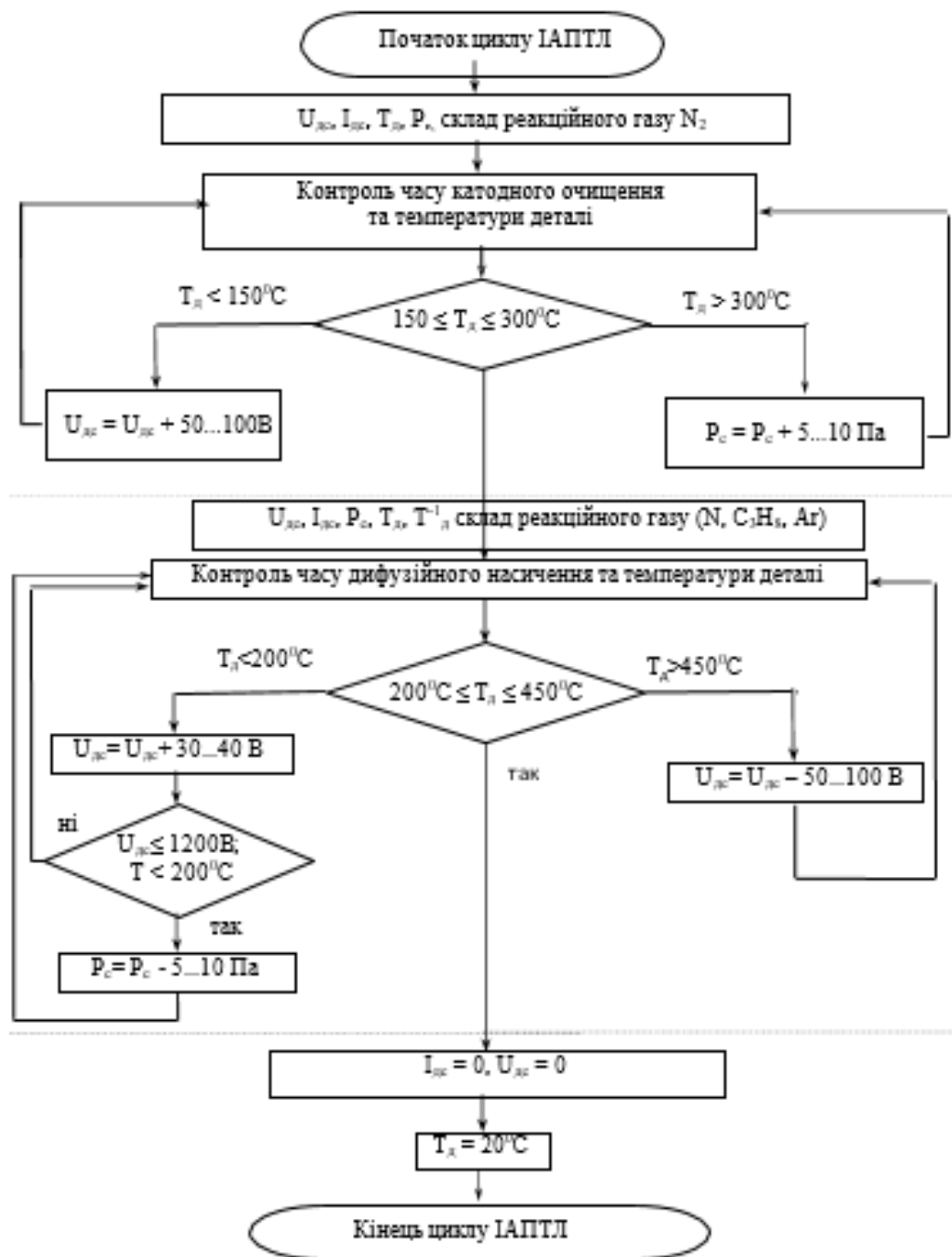


Рисунок 3.13 – Алгоритм технологічного процесу ІАПТЛ

У пункті 3.1 були приведені: оптимальні режими які були отримані у ході експериментів, методи підготовки оснастки та деталі, процес азотування, та процес контролювання даного методу обробки. На підсумках отриманих даних, був побудований алгоритм технологічного процесу (рис.3.13). Даний алгоритм може використовуватись у майбутньому під час автоматизації процесу азотування.

У пункті 3.2 було зроблено та запропоновано технологію підготовки та проведення дослідів після термо-хімічної обробки. Описані методи контролю якості покриття. Отримані дані показують, що поверхня яка підлягала термо-хімічній обробці, збільшила твердість на 20% у порівнянні з вихідною твердістю. Це свідчить про правильність підібраних параметрів та режимів азотування. Зміцнення поверхні відбулося на глибину 2-3 мкм. Для збільшення глибини дифузії слід збільшити час проведення дослідів з 8 до 10 годин, а також збільшити робочу напругу до 1700 кВ.

## 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ

В таблиці 4.1 послідовно проаналізовано:

- Зміст ідеї(що пропонується);
- Можливі напрямки застосування;
- Основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- Чим відрізняється від існуючих аналогів;

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Іонне азотування в плазмі тліючого розряду	Промислове	З комерційно доступних методів та технологій зібрана система керування та розроблений технологічний процес для зміцнення внутрішньої поверхні циліндричної деталі за допомогою іонного азотування в плазмі тліючого розряду

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї

- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають гірші показники та параметри (табл. 4.2).

Нижче наведені аналоги установок іонного азотування.

*1. Модернізована установка для іонного азотування ВУ – 1Б.*

Технічні характеристики установки для іонного азотування (рис. 4.1) вказані в табл. 4.1[24]

Таблиця 4.2 - Технічні характеристики ВУ – 1Б[24]

1	Граничний тиск в чистій, пустій і знежиреній камері, при охолодженні її холодною водою, Па	$1.33 \cdot 10^{-3}$
2	Час, за який досягається граничне значення тиску $1.33 \cdot 10^{-3}$ , хв	40
3	Розміри робочої камери: - висота - діаметр	510 600
4	Об'єм робочої камери, м <sup>3</sup>	0,23
5	Граничні розміри оброблюваної деталі: - діаметр; - довжина	60 200
6	Електрична потужність, яку використовує установка в робочу режимі, не більше, кВт	500
7	Тиск стисненого повітря, Па	від $39 \cdot 10^4$ до $49 \cdot 10^4$
8	Швидкість осадження покриття, мкм/год	15-30



Рисунок 4.1 Модернізована установка азотування ВУ – 1Б [24]

## 2. Установка Булат – 6

Данна установка(рис 4.2) призначена для нанесення тонкоплівних зносостійких покриттів завтовшки від 4мкм до 10 мкм за допомогою конденсації суміші у вакуумній за допомогою іонного бомбардування.



Рисунок 4.2 – Установка Булат – 6 [24]

Таблиця 4.3 - Технічні характеристики Булат – 6[24]

1	Граничний тиск в чистій, пустій і знежиреній камері, при охолодженні її холодною водою, Па	$1 \cdot 10^{-3}$
2	Час, за який досягається граничне значення тиску $1.33 \cdot 10^{-3}$ , хв	60
3	Розміри робочої камери: - висота - діаметр	300 400
4	Об'єм робочої камери, м <sup>3</sup>	0,17
5	Граничні розміри оброблюваної деталі: - діаметр; - довжина	40 160
6	Електрична потужність, яку використовує установка в робочу режимі, не більше, кВт	300
7	Тиск стисненого повітря, Па	від $39 \cdot 10^4$ до $49 \cdot 10^4$
8	Кількість дугових випаровувачів, шт	2

В порівнянні приведено модернізовану установку ВУ – 1Б призначена для азотування внутрішніх поверхонь циліндричних деталей, що дає змогу оброблювати більшу кількість деталей. Також була розроблена нова оснастка та процес, що дає змогу більш якісно і точно керувати процесом і режимами азотування.

Таблиця 4.4. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ n/ n	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W	N	S
		Мій проект	Конкурент1	-	-	+
1.	Стабільність проходження процесу	Модернізована установка ВУ – 1Б	Булат - 6	+	-	+
2	Здатність азотування внутрішніх циліндричних поверхонь	Модернізована установка ВУ – 1Б	Булат - 6	+	-	+
3	Продуктивність процесу	Модернізована установка ВУ – 1Б	Булат - 6	+	-	+
4	Вартість обладнання	Модернізована установка ВУ – 1Б	Булат - 6	-	+	+



Проведено аудит за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (табл. 4.5)

Таблиця 4.5 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/ п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Джерело живлення	ТПЗ – 3 - 350	Наявні	<a href="http://www.tor-trans.com.ua/stepuptransformer.html">http://www.tor-trans.com.ua/stepuptransformer.html</a>
2	Натікач газу	НРП – 1.6	Наявні	<a href="https://zcv.ru/cat/1715/95/%D0%B2%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%83%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0/-16-detail">https://zcv.ru/cat/1715/95/%D0%B2%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%83%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0/-16-detail</a>
3	Фіксування значення робочої напруги	Датчик напруги LV 25-P	Наявні  Наявні	<a href="https://www.components-mart.com/product/LEM-USA,Inc/LV-25-P.html">https://www.components-mart.com/product/LEM-USA,Inc/LV-25-P.html</a>

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Найбільш ефективним засобом оздоровлення умов праці є удосконалення технології газотермічного нанесення покриттів, а саме (в нашому випадку) – іонне азотування у плазмі тліючого розряду: застосування матеріалів для хіміко-термічної обробки (гази та їх суміші) з мінімальним вмістом токсичних речовин, більш ширше використання механізованих і автоматизованих процесів при іонному азотуванні у тліючому розряді.

На робочих місцях необхідно забезпечити мінімальний рівень вмісту шкідливих речовин в повітрі, низький рівень шуму при процесі формування покриття.

При роботі операторів і підручних існує загроза ураження електричним струмом, одержання опіків від частин, що підлягають нагріванню, та інше.

Заходи електробезпеки на ділянках і окремих робочих місцях при роботі повинні відповідати загальноприйнятим вимогам для хіміко-термічної обробки та споріднених процесів, в нашому випадку – іонному азотуванні у тліючому розряді.

Розглянемо питання охорони праці при формуванні зносостійкого покриття під дією струменя низькотемпературної плазми, завданням яких є створення безпечних, нешкідливих і сприятливих умов праці, як одне з важливих завдань і має не тільки інженерне, а й соціальне значення.

Мета роботи – забезпечення належних умов праці під час іонного азотування у плазмі тліючого розряду

## 5.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

При здійсненні іонного азотування згідно запропонованій технології можливі наступні небезпечні і шкідливі фактори.

Виділення газів, підвищений рівень шуму, інфрачервоне випромінювання матеріалу при обробці. Джерелом цих шкідливих факторів є, в основному, установка [23].

Також виникає небезпека враження електричним струмом, пожежна небезпека, значна загазованість, загроза для навколишнього середовища.

При розробленій технології іонного азотування внутрішніх поверхонь циліндричних деталей малого діаметру наявні всі основні шкідливі небезпечні виробничі фактори (ШНВФ), а саме фізичні, хімічні, психофізіологічні [23].

**Фізичні ШНВФ. Віброакустичні фактори. Шум та ультразвук.** Підвищений рівень шуму та ультразвуку. Шум має відповідати державному нормативу ДСН 3.3.6. 037-99 «Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Максимальна норма за рівнем шуму за даним документом дорівнює 80 дБА.

Звукові і ультразвукові коливання супроводжують процес іонного азотування мають аеродинамічне походження. Основну частину звукового фону складає аеродинамічний шум газової струмини, яка витікає із натікача газу [23].

Інтенсивність звукового та ультразвукового тиску може сягати 120 - 130 дБА [23].

Згідно вище сказаного, необхідно проводити комплексні заходи по захисту працюючих, включаючи будівельні акустичні заходи, використання дистанційного керування, засоби індивідуального захисту.

Засобами індивідуального захисту є навушники. Вони необхідні оператору при закріпленні або знятті деталі, що обробляється, так як процес відбувається при відкритих дверцятах камери.

*Вібрація.* Вібрація відповідає нормативному документу ДСН 3.3.6 039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» і не впливає на стан здоров'я оператора [5].

Також, процес супроводжується підвищеним рівнем *ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання.*

Важливе значення для плазмового наплавлення має штучне й дійсне освітлення робочих місць. Існує загроза в недостатньому освітленні.

Захист оператора від перерахованих вище небезпечного шкідливих факторів – це, знову ж таки, захисна камера. Ця камера герметично зачиняється, монтується системою витяжної вентиляції. Для спостереження процесу наплавлення на дверцятах розміщені вікна із захисним склом. В камері встановлені люмінесцентні лампи.

**Хімічні ШНВФ.** *Запиленість та загазованість.* Іонне азотування супроводжується підвищеною загазованістю робочої зони. При азотуванні в середовищі азту, як в нашому випадку, концентрація пилу знаходиться в межах 0,9 - 1,3 мг/м<sup>3</sup>. Процес плазмового наплавлення супроводжується утворенням *газів*: оксиду азоту, озону.

Захист оператора від перерахованих вище небезпечного шкідливих факторів – це, знову ж таки, захисна камера, що монтується системою витяжної вентиляції.

**Психофізіологічні ШНВФ.** До психофізіологічних ШНВФ, при іонному азотуванні, можна віднести фізичні перевантаження, що викликане гіподинамією, а також нервово-психічні перенавантаження, що викликані емоційальною природою.

## 5.2 Нормативні вимоги безпеки та гігієни праці

**Вимоги до технологічного процесу.** Для проведення іонного азотування виділяємо окреме приміщення цеху. Допоміжні операції для іонного азотування (механічна обробка, очищення, приготування порошків тощо) проводитися за межами основних ділянок, де безпосередньо виконується іонне азотування.

Установка напівавтоматична (в нашому випадку) повинні мати аспіраційну систему, вбудовану в технологічну оснастку.

Установка, яка використовує потужне джерело живлення має відповідати вимогам Санітарних норм та правил роботи із джерелами електромагнітних полів радіочастотного діапазону (у відповідності з ДСН 3.3.6.096-2002).

Балони із азотом встановлюємо за межами ділянки іонного азотування з наступною подачею газу до газозабірної щита.

Для усунення можливості ураження електричним струмом разом з загальними засобами електробезпеки необхідно перевіряти роботу кнопових пристроїв дистанційного вмикання і вимикання установки з метою запобігання випадковому пуску обладнання та блокуючих пристроїв, що забезпечують автоматичне відключення електроживлення у разі зупинки подачі води для охолодження, а також блокування кожуха, що закриває струмопідвідні частини осцилятора і відключає електроживлення при зніманні кожуха [23].

Усі операції з іонним азотування в тліючому розряді потрібно проводити не менш ніж двома робітниками згідно з [23].

**Вимоги до виробничих приміщень.** Відстань між устаткуванням, від устаткування до стін та колон приміщення, інших споруд, ширина проходів та

проїздів повинні відповідати чинним будівельним нормам та нормам технологічного проектування цехів ДБН В.2.2 – 28:2010.

Підлога для виробничих приміщень повинна бути виготовлена з матеріалів, що не згоряють і мають малу теплопровідність. Підлога повинна мати рівну не ковзку поверхню.

Виробничі приміщення повинні бути обладнані загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією відповідно до ДБН В.2.5-67:2013.

Подавання припливного повітря треба здійснювати в робочу зону або у напрямку робочої зони. Температура повітря, що подається вентиляційними установками, повинна бути не нижче  $+20^{\circ}\text{C}$  згідно з ДСН 3.3.6.042-99

Освітлення цехів, ділянок і робочих місць, де виконуються роботи з іонного азотування та допоміжних операцій, повинно відповідати ДБН В.2.5 – 28 – 2006 [23]

**Вимоги до організації робочих місць.** Розмірні характеристики робочого місця при механізованих і автоматизованих роботах, а також розміщення органів керування і засобів відображення інформації мають відповідати вимогам ДСТУ 2456 – 94 [11].

Розташування обладнання проводимо таким чином, щоб ширина проходів складала:

- між стіною будинку та обладнанням – не менш 0,5 м;
- між стаціонарними джерелами живлення – не менш 0,8 м;
- між обладнанням та місцями складування – не менш 1,0 м.

**Вимоги до вентиляції.** Згідно з ДСТУ 2456-94 місцева вентиляція повинна використовуватись при плазмовому напыленні. Вона також повинна застосовуватись в комбінації з місцевою вентиляцією, розрахованою на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин не локалізованих місцевими витяжними пристроями (відсмоктувачами).

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, повинна бути не менше 1,3 м/с.

### 5.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки обладнання

**Електробезпека.** Обладнання для іонного азотування, а саме установка «ВУ – 1Б» відноситься до I класу – вироби, що мають робочу ізоляцію та елемент для заземлення. Якщо такий виріб має провід для приєднання до джерела живлення, то цей провід повинен мати заземлюючу жилу і вилку із заземлюючим контактом [23].

Ураження людини електричним струмом може відбутись у випадку торкання не струмоведучих частин установки, на яких з'явилась напруга в аварійному режимі (коло протікання струму: рука – тіло – земля), або торкання малопотужних кіл керування під час нормальної роботи установки. В останньому випадку напруга торкання не перевищує 5 В постійного струму. Рід струму, що уражує людину – змінний, промислової частоти.

Рівні напруг, які використовуються в установці:

- у силових колах живлення – 1...1.5 кВ;
- у колах живлення блоків керування – 220В.

Для аварійного вимикання елементів установки передбачено автоматичні вимикачі.

Безпека при роботі електроустановок забезпечується такими заходами:

використання ізоляції; відведенням струмоведучих частин у недосяжне місце; блокуваннями; ізоляцією електричних мереж від землі; використанням ізолюючих майданчиків.

Орієнтація в даній установці забезпечується:

- сигнальними світло діодами на пульті керування;
- відповідне розташування та колір неізольованих струмоведучих частин, а саме: шин вторинного контуру.

Навчання персоналу безпечним прийомом роботи мають проводитись відповідно до ГОСТ 12.0.004-79 та глави Э.1.3 «Правила

технической эксплуатации электроустановок», а саме:

- нові робітники навчаються безпечним методам та прийомам праці під керівництвом висококваліфікованого робітника, бригадира або іншого спеціаліста, який має необхідну підготовку;
- допуск до самостійної роботи повинен бути зафіксований датою
- та підписом інструктора в журналі реєстрації інструктажу на робочому місці;
- повторний інструктаж проводиться не рідше ніж через 6 місяців незалежно від кваліфікації, освіти і стажу роботи.

**Вибір засобів індивідуального захисту.** Спецодяг, спецвзуття, засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) органів дихання, очей, голови повинні видаватися відповідно до типових галузевих норм. ЗІЗ (табл.5.1) [23] слід добирати з урахуванням конкретних умов праці, наявності тих чи інших небезпечних виробничих факторів: спецодяг – залежно від методів обробки та умов праці.



Таблиця 5.1 - Засоби індивідуального захисту [23]

Спосіб нанесення покриття	Умови праці	Призначення спецодягу	Рекомендовані типи спеціального одягу	Група спец. одягу
Азотування	Виробниче приміщення	Захист від виробничих забруднень, механічних пошкоджень за умов нормального мікроклімату	Брезентовий одяг з вогнетривким просоченням та захисними накладками із спилка (ТУ 170869-77),захисні окулярами, рукавиці	4Б

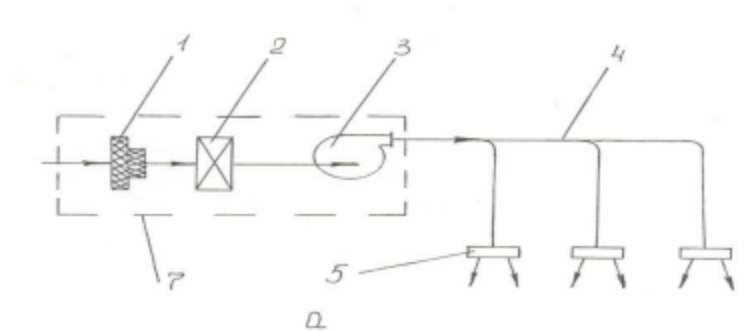
**Вибір вентиляції.** Одним із ефективних засобів нормалізації повітря в цеху є вентиляція.

У приміщенні, де знаходиться установка плазмового іонного азотування, встановлюємо загальну припливно-витяжну вентиляцію, а робоче місце, де безпосередньо здійснюється процес нанесення покриття, обладнуємо місцевою витяжною вентиляційною установкою, «ВУ – 1Б».

Очищення повітря від пилу здійснюється за допомогою рукавного фільтра, виготовленого із натурального матеріала (бавовна).

Для уловлювання газів у системі вентиляції застосовуємо паперовий фільтр ПФ-90.

Отже, розроблений місцевий відсмоктувач задовольняє нашим вимогам.



1 – пилоочисний фільтр; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – магістральний повітровід; 5 – вентиляційні нагнітальні насадки;

Рисунок 5.1 Схема механічної (припливної) вентиляційної установки[23]

## 5.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

### 5.4.1 Пожежна безпека

При експлуатації обладнання необхідно дотримуватись правил протипожежної безпеки при експлуатації дугових установок.

Необхідно суворо слідкувати за станом дротів і кабелів, не допускати їх механічного пошкодження.

Корпуси агрегатів установки повинні бути надійно заземлені. Справність заземлення необхідно періодично перевіряти.

Обов'язково повністю вимикати установку при:

- несправностях, які з'явилися;
- очистці, змазуванні, профілактичних роботах;
- частковій перерві роботи.

Система охолодження установки повинна бути налагоджена.

Підключення, відключення і ремонт установки плазмового наплавлення проводиться тільки спеціалістом відповідної кваліфікації. Операторам і їх підручними категорично забороняється проводити зазначені роботи.

Згідно з НАПБ Б.0.3.002.2007 [15] приміщення з точки зору вибухо-, пожежо-, небезпеки належать до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розплавленому та розжареному станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої енергії, іскор, полум'я).

Клас пожежі – С, Д, металів та їх сплавів, аваріями електроустановок [7]. В якості вогнегасних засобів можна використовувати газові сполуки -CO<sub>2</sub>, галоїдовуглеводні, порошки (H<sub>2</sub>O – для охолодження).

В цеху повинно бути:

Вогнегасники ручні (1-2 на 100 м<sup>2</sup>).

Пінний вогнегасник (2 екземпляри).

Ящик з піском не менш 0,5 м<sup>3</sup>.

В цеху повинен бути точний план евакуації:

Ширина його виходів –

прохід	- 1 м
коридор	- 4 м
двері	- 0,8 м.

При організації технологічного процесу необхідно дотримуватися усіх вимог електростатичної іскробезпеки (ГОСТ 12.1.018-79).

Приміщення для іонного азотування повинні пройти атестацію на дотримання правил пожежної безпеки.

#### **5.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

У випадку пробією електричної напруги на корпус установки необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника ділянки.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити установку від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити пострадалому штучне дихання.

У випадку загорання установки необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника ділянки та звернутися в медпункт.

## ВИСНОВКИ

В даному дипломному проекті була розглянута можливість впровадження у виробництво підвищення ресурсу і працездатності внутрішніх поверхонь циліндричних деталей за допомогою іонного азотування в плазмі тліючого розряду в умовах сучасного економічного розвитку української промисловості та розроблено технологічний процес. В процесі роботи отримані наступні результати:

- проведений аналіз методів зміцнення внутрішніх циліндричних поверхонь та їх продуктивність. Запропоновано спосіб, який дозволяє підвищити міцність та експлуатаційні характеристики робочої поверхні;
- на основі проведених дослідів було розредлено технологічний процес підвищення міцності поверхні. Також були розроблені режими процесу іонного азотування. Обрано метод іонного азотування в плазмі тліючого розряду. Цей метод являється екологічно чистим, а також є економічно вигідним та має більшу продуктивність за своїх аналогів;
- обрано та модернізовано обладнання та оснастка для хіміко-термічної обробки;
- розроблено стартап проект про впровадження даного методу у серійне виробництво;
- прийняті в розділі охорони праці рішення дозволяють зробити процес безпечним, як для персоналу так і навколишнього середовища.

Представлена технологія може бути впроваджена у виробництво і, як показав розрахунок, є економічно доцільною.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Lapanche H. Nituration alassigul et ionitration
- 2 Metallurgie et la construction mecanique. – 1963. – N 10. – P. 849–855; N 11. – P. 837–953.
- 3 Tool Steels, 5th Edition / George Adam Roberts, Richard Kennedy – 361с.
- 4 А.А. Андреев. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изде-291. лий. – ФП ФИП PSE, 5(3–4) (2007) 140–148.
- 5 А.В. Белый, В.А. Кукареко, И.Ю. Тарасевич, С.К. Ших, И.В. Бояренко. Влияние плотности ионного тока на структурные параметры и свойства поверхностных слоев хромосодержащих сплавов железа, модифицированных ионами азота. – Физика и химия обработки материалов 2000, №4, с.11–17.
- 6 Азотирование в пульсирующей плазме по технологии ЭЛЬТРОПУЛЬС 37. (ELTROPULS) фирмы ЭЛЬТРО ГмбХ, Германия. <http://eltromoskau.narod.ru/2/ eltropuls.htm>
- 7 Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М. О роли атомарного азота при химикотермической обработке сталей в газовом вакуумно-дуговом разряде. – Сб. докл. Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», Харьков, ННЦ ХФТИ. 2005, ч. 1. с. 246–250
- 8 Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-64. термическая обработка сплавов: Монография.–Изд. МГТУ им Баумана, 1999. – 400 с.
- 9 Афонский И.Ф., Смирнов А.В, Вер О.И. Теория и практика азотирования стали. – Л.: Госмаш-метиздат, 1933. – 160 с.
- 10 Балашов Б.Ф. Азотирование как метод повышения прочности деталей машин // Повышение усталостной прочности деталей

машин поверхностной обработкой. – М.: Машгиз, 1952. – С. 64–82.

- 11 Берлин Е. В. Й Сейдман Л. А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной 1. технологии. Издательство «Техносфера», Москва, 2010, 528 стр.
- 12 Будилов В.В., Агзамов Р.Д. Ионное азотирование поверхности конструкционных 265. сталей и сплавов в тлеющем разряде на основе эффекта полого катода. – Proc. of 6th Intern. Conf. on Modif. of Mater. with Particle Beams and Plasma Flow. – Russia, Tomsk, 2002. p.428–431.
- 13 Бутенко О.И., Головчинер Я.М., Скотников С.А. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 122–128.
- 14 Глазов В.М. Микротвердость металлов и полупроводников / Глазов В.М., Вигдорович В.Н. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с. Похмурский В.И. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий / Похмурский В.И., Далисов В.Б., Голубец В.М. Киев: Наукова думка, 1980. – 188 с.
- 15 Д. П. Борисов, Н. Н. Коваль, П. М. Щанин. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накалимым катодом. – Известия высших учебных заведений. Физика. 1994 №3, с.115–120 Д.П.Борисов, В.В. Гончарова, В.М. Кузьмиченко, В.М.Савостиков и С.М. Серге-57. еев. Ионно-плазменное азотирование легированной стали с применением дугового плазмогенератора низкого давления. – Металловедение и термическая обработка металлов, 2006, № 12, с. 11–15.
- 16 И.Г.Марченко, И.И.Марченко, А.Г. Гугля, И.М. Неклюдов. Компьютерное моделирование ионного азотирования аустенитных сталей. – Физика и химия обработки материалов. 2005 №1, с.56–60.

- 17 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450-76. – [Чинний від 1976-01-09]. – М.: ИПК издательство стандартов, 1976.
- 18 Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. – М.: Машиностроение, 1976. – 255 с.
- 19 Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г., Бемер З. Теория и технология азотирования: 65. Монография. – М.: «Металлургия», 1991.– 320 с.
- 20 Лахтин Ю.М., Крымский Ю.Н., Семенов В.А. Азотирование высокопрочного чугуна в тлеющем разряде // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1964. – № 3. – С. 37–41.
- 21 Марочник сталей и сплавов/ В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина – М.: Машиностроение, 1989.- 640с.
- 22 Минкевич, А.Н. Химико - термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1965. –491 с.
- 23 Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник для студентів зварювальних спеціальностей / О.Г. Левченко. – К.: Основа, 2019.–240 с.
- 24 П. М. Щанин, Н. Н. Коваль, Ю. Х. Ахмадеев. Общая экспериментальная техника генерации газоразрядной плазмы в дуговом источнике с холодным полым катодом. – Приборы и техника эксперимента, 2005, №3, с. 62–66.
- 25 П.М. Щанин, Н.Н. Коваль, Ю.Х. Ахмадеев, СВ. Григорьев. Дуговой разряд с 269. холодным полым катодом в скрещенных электрическом и магнитном полях. – Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 5, с.24–29.
- 26 Пастух, И.М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем розряде: состояние и перспективы [Текст]/ И.М. Пастух // Проблеми трибології. – 2004. – № 3. – С. 42– 55.



27 Пат. 10014 Україна, МПК 7 C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В.І, Радько О.В.; Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.

28 Пат. 10014 Україна, МПК<sup>7</sup>C23C8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно- плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мір-ненко В.І., Радько О.В.; Заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12. – 5 с.

# ДОДАТКИ