

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

**Навчально – науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

« ____ » _____ 2021 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Металознавство та комп'ютерне
моделювання процесів термічної обробки»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

на тему: «Підвищення втомної міцності сплаву ЧС70»

Виконав:

студент VI курсу, групи ФТ – 01мп
Орищук Олексій Володимирович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н., доцент
Бобіна Марина Миколаївна _____

Консультанти:

з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях
зав. каф., д.т.н., проф. _____

Левченко Олег Григорович _____

з економічно-організаційного розділу

доцент, к.е.н., доцент

Нараєвський Сергій Вікторович _____

Нормоконтроль:

доцент, к.т.н.

Христенко Вадим Володимирович _____

Рецензент:

проф., д.т.н., проф.

Мініцький А.В. _____

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

Студент _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально – науковий інститут матеріалознавства та зварювання
Імені Є. О. Патона
Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

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

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Спеціалізація – «Металознавство та комп'ютерне моделювання процесів термічної обробки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Мирослав

Карпець

«01» вересня 2021р

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Орищук Олексій Володимирович

- 1, Тема дисертації «Підвищення втомної міцності сплаву ЧС70», науковий керівник дисертації Бобіна М.М. доц., к.т.н., доц., затверджено наказом по університету від «15» листопада 2021 р № 3740-с
2. Термін подання студентом дисертації 17 грудня 2021р.
- 3, Об'єкт дослідження: вплив іонно- плазмового азотування на хімічний та фазовий склад, а також мікротвердість поверхневого шару; визначення втомної міцності сплаву ЧС-70 після іонно-плазмового азотування.

- 4, Вихідні данні, літературні данні, результати попередніх досліджень.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити. Літературний огляд; матеріали та методика досліджень; експериментальні результати; організаційно – економічна частина, охоронна праці.
6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу.
- 7, Орієнтований перелік публікацій: 1 – вплив іонно-плазмового азотування на хімічний та фазовий склад сплаву ЧС70; 2 – втомна міцність сплаву ЧС-70 після іонно-плазмовго азотування.
8. Консультанти розділів дисертації .

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г. зав. каф., професор		
Економічно-організаційний розділ	Нараєвський С.В., к.е.н., доцент		
Нормоконтроль	Христенко В.В., доцент, к.т.н.		

9. Дата видачі завдання 01 вересня 2021р.

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний огляд	01.09,2020 - 31.10.2021р	

2.	Ознайомлення та освоєння методик використаних в роботі.	06.09-20.09.2020р	
3.	Підготовка зразків та проведення мікрорентгеноспектрального аналізу.	21.09.2020 – 20.12.2020	
4.	Проведення мікроструктурного та дюрOMETричного та фрактографічного аналізів зміцнених зон сплаву ЧС-70 після плазмового азотування.	21.12.2020-15.11.2021р	
5.	Проведення випробувань втомної міцності.	01.03.2021-20.06.2021	
6.	Проведення рентгенофазового аналіза	01.11.2021-31.11.2021	
7.	Аналіз отриманих даних та їх обробка	01.11.2021-31.11.2021р	
	Розрахунок економічної частини	28.10-01.11.2021р	
	Розрахунок питань охорони праці	01.11-15.11.2021р	
	Оформлення пояснювальної записки	15.11-20.11.2021р	

Студент

Олексій ОРИЩУК

Керівник

Марина БОБІНА

РЕФЕРАТ

4

Магістерська дисертація: 80 с., 27 рис., 6 табл., список літератури з 32 джерел.

Об'єкт дослідження: вплив іонно-плазмового азотування на хімічний та фазовий склад, а також мікротвердість поверхневого шару; визначення втомної міцності сплаву ЧС70 після іонно-плазмового азотування.

Метою роботи є підвищення втомної міцності жаростійкого сплаву на основі нікеля ЧС70 після плазмового азотування.

Методи дослідження: мікроструктурний, дюрOMETричний, рентгенофазовий, фактографічний, випробування втомної міцності.

Досліджено вплив іонно-плазмового азотування на хімічний, фазовий склад поверхневого шару нікелевого сплаву ЧС70. Проведено випробування на втому зразків у вихідному стані та після технологічної обробки. На поверхні утворився однорідний шар товщиною 3 мкм, з підвищеним вмістом азоту та кисню. Загальна товщина з підвищеною мікротвердістю 8-9 мкм. Завдяки сформованому зміцненому шару на поверхні зразків підвищуються характеристики опору втомі. Показано, що після іонно-плазмового азотування зразків їхня межа витривалості на базі $N = 10^7$ цикл на 32% вища, ніж у вихідному стані.

сплав ЧС-70, іонно-плазмове азотування, хімічний склад, мікротвердість, фазовий склад, втомна міцність, осередок тріщиноутворення.

ABSTRACT

Master's thesis: 86 p., 27 figures, 6 table, list of references from 32 sources

Object of Research: influence of ion-plasma nitriding on chemical and phase composition, as well as micro-hardness of the surface layer; determination of fatigue strength of alloy CHS70 after ion-plasma nitriding.

The purpose of the work is to increase the fatigue strength of the heat-resistant nickel alloy CHS-70 after plasma nitriding.

Research methods: microstructural, durometric, X-ray, factographic, fatigue strength test.

The influence of ion-plasma nitriding on the chemical, phase composition of the surface layer of nickel alloy ChS-70 was investigated. Tests were carried out on the content of samples in the initial state and after technological processing. A homogeneous layer 3 microns thick was formed on the surface, with a high content of nitrogen and oxygen. The total thickness with increased micro-hardness is 8-9 microns. Due to the formed strengthened layer on the surface of the samples, the characteristics of fatigue resistance are increased. It is shown that after ion-plasma nitriding of samples, their endurance limit based on $N = 10^7$ cycle is 32% higher than in its original state.

ALLOY CHS-70, ION-PLASMA NITRIDING, CHEMICAL COMPOSITION, MICRO-HARDNESS, PHASE COMPOSITION, FATIGUE STRENGTH, CRACK FORMATION CENTER.

ЗМІСТ

1	ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1	Актуальність теми.....	12
1.2	Жароміцні сплави на основі нікеля.....	13
1.2.1	Загальні вимоги до сплавів.....	13
1.2.2	Легування, термічна обробка, структура.....	14
1.3	Робота лопаток ГТД.....	17
1.4	Плазмове азотування як метод поверхневого зміцнення.....	19
1.5	Аналіз літературних даних та постановка задачі.....	21
2	МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
2.1	Об'єкт дослідження та технологія обробки.....	23
2.2	Технологія іонного азотування.....	24
2.3	Мікроструктурний та дюрOMETричний аналізи.....	25
2.4	Випробування втомної міцності.....	28
3	ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	30
3.1	Вплив зміцнюючої обробки на хімічний склад поверхневого шару сплаву ЧС70.....	30
3.2	Результати випробувань втомної міцності сплаву ЧС70.....	40
	ВИСНОВКИ.....	44
4	ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	46
4.1	Науково-технічна ефективність НДРР.....	46
4.2	Розрахунок витрат на проведення НДР.....	46
4.2.1	Витрати на оплату праці.....	46
4.2.2	Єдиний соціальний внесок.....	47
4.2.3	Матеріали необхідні для проведення дослідження.....	47
4.2.4	Енергоносії для проведення дослідження.....	48
4.2.5	Витрати на спеціальне обладнання.....	48
4.2.6	Вартість послуг сторонніх організацій.....	49
4.2.7	Витрати на службові відрядження.....	49
4.2.8	Інші прямі невраховані витрати.....	49
4.2.9	Накладні витрати.....	49
4.2.10	Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	50
4.3	Науково-технічна ефективність НДР.....	51
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...55	55
5.1	Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ).....	55
5.1.1	Аналіз мікроклімату в робочій зоні приміщення.....	57
5.1.2	Аналіз освітленості приміщення.....	59
5.1.3	Аналіз впливу шуму та вібрацій.....	60
5.1.4	Аналіз забрудненості повітря.....	60
5.2	Електробезпека.....	61

5.3	Вентиляція приміщення лабораторії.....	62
5.4	Вентиляція приміщення.....	62
5.5	Пожежна безпека.....	66
5.6	Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	68
	ВИСНОВКИ.....	74
	ЛІТЕРАТУРА.....	75

ВСТУП

З розвитком авіаційної та ракетно-космічної індустрії зростає потрібність в вдосконаленні вже існуючих матеріалів та винайдення та застосування нових матеріалів, які будуть відповідати технологічним вимогам в промисловості.

Сплави на основі нікелю є одними із головних матеріалів в авіації, які прекрасно себе зарекомендували в якості лопаток газотурбінних двигунів, ракето-будуванні, суднобудуванні. А саме жароміцні сплави на основі нікелю, такі як: ЧС70, ЧС104, ЧС43 і т.п. Робочі температури нікелевих сплавів в середньому доходять до 700-1100 °С і вище. Жароміцні сплави на основі нікелю та залізо-нікелю складають 70% маси газотурбінного двигуна: диски, соплові та робочі лопатки турбіни, камери згоряння і т.п.

Соплові лопатки працюють при температурах до 1150 °С і невеликих напруженнях, а диски – пр. температурах 600 – 800 °С і більш високих робочих навантаженнях (500 – 600 МПа), тому жароміцні сплави, які використовуються в цих групах деталей, значно відрізняються за хімічним складом.

Сучасні нікелеві жароміцні сплави працюють на межі своїх температурних можливостей, так як робочі температури часто досягають 0,8 – 0,85 температури солідуса [1].

Для збільшення продуктивності двигуна та збільшення швидкості літака потрібно дотримуватись двом факторам: вдосконалювати конструкцію самого двигуна для підвищення його корисної дії та збільшувати робочі температури в камерах згоряння для збільшення реактивної тяги. Для другого фактора потрібно збільшувати робочі температури безпосередньо самих матеріалів, які застосовуються в камерах згоряння, та підвищувати їх втомну міцність від якої залежить термін дії деталей.

Сучасний рівень властивостей жароміцних нікелевих сплавів досягнутий завдяки ускладненню їх системи легування. Відповідно ускладнилися структура і фазовий склад цих сплавів. Подальше збільшення вмісту легуючих

елементів призводить до істотного подорожчання сплаву, а часто і до незкомпенсованості фазового складу, виділенню несприятливих фаз в ході роботи і зниження технологічних і службових характеристик матеріалів [2].

Вплив експлуатаційних факторів на технічний стан об'єктів проявляється у вигляді відхилень параметрів від норм внаслідок зносу, старіння деталей та регулювання агрегатів.

Необхідність підвищення ресурсів і якості роботи лопаток газотурбінних двигунів та інших деталей в ракетобудуванні, суднобудуванні, авіабудуванні з метою зниження витрат на ремонт вимагає відповідності високим критеріям по точності виготовлення і якості поверхневого шару (мікротвердість, шорсткість) та бути стійкими на знос, ударну та втомну міцність. Такі вимоги до відповідальних деталей можуть бути виконані тільки при використанні дорогих матеріалів з додатковою термічною обробкою та при використанні методів хіміко-термічної обробки таких як азотування.

Застосування процесу азотування спрямоване на зміцнення різноманітних сталей і сплавів, деталей машин та інструментів, що експлуатуються за різних умов. Азотування має багато технологічних варіантів і вибір того чи іншого процесу визначається технологічністю, можливістю регулювання будови утворюваного шару, швидкістю насичення поверхні, часом підготовчих робіт, рівнем автоматизації, економічністю, дотриманням вимог з охорони праці та навколишнього середовища. Широкого розповсюдження набули процеси азотування в газових середовищах, у рідких середовищах, у вакуумі, тліючому розряді, а також проведення процесів насичення азотом під тиском, імпульсної подачі насичуючих середовищ, розведення аміаку азотом, азотно-водневими сумішами, повітрям тощо. В порівнянні з газовим азотуванням іонно-плазмове азотування забезпечує: скорочення тривалості обробки 5–10 разів, як за рахунок скорочення часу нагріву і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки; зниження крихкості зміцненого шару; скорочення витрат робочих газів в 20–100 разів; скорочення витрат електроенергії в 1,5–3 разів;

виключення операції депасивації; зниження деформації, що виключає фінішне шліфування; простоту й надійність екранного захисту від азотування незміцнюємих поверхонь; покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва.

Сплави на основі нікелю, такі як ЧС-70, ЧС-104, ЧС-43 тощо, є одними із головних матеріалів в авіації, які прекрасно себе зарекомендували в якості лопаток газотурбінних двигунів, ракетобудуванні, суднобудуванні. Робочі температури нікелевих сплавів в середньому доходять до 700-1100 °С і вище. Жароміцні сплави на основі нікелю та залізо-нікелю складають 70% маси газотурбінного двигуна: диски, соплові та робочі лопатки турбіни, камери згоряння. Перспективним шляхом зміцнення таких деталей, які виготовлені із нікелевих сплавів, є саме плазмове азотування.

Тому вирішення задачі підвищення працездатності, довговічності та стійкості виробів з жаростійких нікелевих сплавів на цей час є вкрай актуальним.

Метою даної роботи є підвищення втомної міцності жаростійкого нікелевого сплаву ЧС-70 шляхом іонно-плазмового азотування.

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Актуальність теми

Розробка та удосконалення нікелевих сплавів є задачею державного значення, оскільки Україна займає провідне місце в енергетиці (ГЕС) та в наші дні активно розвивається авіабудування.

Загострення конкурентної боротьби на світовому ринку авіаційного будування двигунів висуває нові вимоги щодо підвищення надійності, працездатності і економічності газотурбінних двигунів (ГТД). Ці вимоги в свою чергу ставлять перед розробниками і виробниками ВМД завдання збільшення гарантованого ресурсу, підвищення потужності двигунів при одночасному зниженні їхньої ваги. Ресурс і економічність двигунів визначаються працездатністю турбіни, в першу чергу, найбільш навантаженої її частиною - I і II ступенями [3], які будуються з жароміцних нікелевих сплавів.

Для утримання місця на світових ринках потрібно збільшувати потужність двигунів. В першу чергу збільшення потужності двигуна досягається збільшенням температури в камерах згорання. В енергетичних стаціонарних установках вони доходять до 700 °С, в авіації – давно перевищили позначку 1000 °С. Такі підйоми температур досягнуті завдяки розробці та удосконаленні класу металевих матеріалів – жароміцних сталей та сплавів. Ці матеріали здатні довгий час працювати при високих температурах при великих напруженнях та одночасній дії агресивного середовища.

Звичайно, що для даного класу сформувались свої прийоми термічної обробки та легування, які суттєво відрізняються від решт металів та сплавів. Тому на даний момент вже існує великий асортимент нікелевих жароміцних сплавів, які підходять в вузький діапазон сфер застосування, або ж зовсім застаріли.

З постійним науково-технічним прогресом винаходяться нові жароміцні сплави та удосконалюються вже існуючі різними способами, для забезпечення ринку матеріалами, які відповідають вимогам міжнародних стандартів

1.2 Жароміцні сплави на основі нікеля

В основі жароміцних сплавів лежить нікель та залізо. Саме ці два матеріали важаються головними матеріалами для побудови та виготовлення парових та газових турбін. За ГОСТ 5632-72 сталі та сплави, які деформуються, на основі заліза та нікеля ділять на сталі та сплави, ґрунтуючись із вмісту елемента – основи і легуючих елементів.

До сплавів на залізо-нікелевій основі відносять композиції, які мають в своєму складі суму нікеля та заліза більше 65 % при відносному вмісту нікеля до заліза 1:1,5. Сплавами на основі нікеля називають матеріали, які містять не менше 55 % нікеля.

Жаростійкими називають матеріали , які протидіють газовій корозії при температурах більше 550 °С і працюють в слабко навантаженому стані.

Термін дії умовно ділять на:

короткочасний – 100 годин;

обмежений – від 100 до 1000 годин;

довготривалий – від 1000 до 10000 і вище [4];

1.2.1 Загальні вимоги до сплавів

Жароміцні матеріали , як окремий клас конструкційних матеріалів став інтенсивно розвиватися у зв'язку з ракетобудуванням.

Турбіна, як джерело або перетворювач енергії начала використовуватись в теплоенергетиці, суднових та авіаційних двигунах. В сучасних двигунах жароміцні сплави складають 40-50 % маси. Чим більша температура газу при вході в турбіну, тим більш підвищується продуктивність двигуна. З підвищенням температури газу зменшується витрати палива та повітря на одиницю потужності. Це привело до того, що є сталі та сплави, які розраховані на різні температури та різний термін дії.

Жароміцними називають сталі та сплави, які здатні працювати при високих температурах протягом певного часу, при цьому витримуючи значні механічні навантаження, при достатній жаростійкості.

Надійність роботи металу оцінюється не тільки міцністю, та пластичністю, яку він зберігає до кінця терміну дії. Тому другою важливою характеристикою є запас пластичності, який визначається експериментально. Гарними показниками для цих сплавів є δ (відносне видовження після розриву) та ψ (відносне звуження після розриву) при випробуваннях на тривалу міцність, якщо значення складають 10 та 10 % відповідно.

Не зважаючи на те, що жароміцні сплави не мають температурного порога крихкості, або вона складає нижче робочої температури, наявність різних концентраторів напружень в реальних конструкціях неодмінно ставить питання про низьку чутливість сплавів до наявності надрізів або тріщин. З цією ціллю значення КСУ (ударна в'язкість) має бути якомога вищою [4].

1.2.2 Легування, термічна обробка, структура

Чистий нікель має низьку тривалу міцність близько 40 МПа при 800 °С за 100 годин та малу стійкість газовій корозії при високих температурах. Необхідні властивості досягаються шляхом комплексного легування, в результаті якого утворюються багатофазні сплави, які відповідають вимогам сучасного машинобудування.

Хімічні елементи, які необхідні для легування жароміцних сплавів поділяються на три групи.

До першої групи належать елементи, які зміцнюють твердий розчин на основі нікелю. Це хром, кобальт, молібден, вольфрам, ванадій, гафній. Окрім зміцнення твердого розчину хрому активно захищає сплав від окислення; молібден, вольфрам, ванадій утворюють разом з хромом різні карбідні фази типу $Me_2_3C_6$, Me_6C [4].

До другої групи елементів відносяться алюміній, титан, ніобій, і тантал. Ці елементи, окрім зміцнення твердого розчину, утворюють з нікелем інтерметалідну сполуку складного типу: $(Ni, Co)_3(Al, Ti, Nb, Ta)$. Окрім інтерметалідної фази, карбідоутворюючі елементи цієї групи утворюють карбіди типу MeC . Алюміній як і хром, утворює захисну оксидну плівку, яка підвищує окалино-стійкість сплаву [4].

До третьої групи можна віднести вуглець, бор, цирконій, і елементи із групи лантаноїдів – лантан, церій, неодим і інші, які вводять в кількості десятих і сотих часток відсотка. Основною метою введення цих елементів є утворення фаз проникнення, зміцнення границь зерен за рахунок сегрегації по границям зерен, утворення спеціальних фаз, рафінування металу від шкідливих речовин, вплив на кінетику фазових перетворень, зміну морфологій фаз, які виділяються [4].

Елементи першої групи впливають на зміцнення жароміцних сплавів через зміну електронної структури твердого розчину. Це призводить, в свою чергу, до пониження енергії дефектів упаковки та дифузійної рухомості атомів, виникнення локальних викривлень електронної структури поблизу розчинених атомів [4].

Жароміцність сплавів перебуває в прямій залежності від кількості зміцнювальної фази. Чим більша об'ємна частка цієї фази, тим вища робоча температура сплаву. В зв'язку з тим, що найбільший вплив на розчинність титану, алюмінію, танталу, ніобію виявляє хром, для збільшення їхньої кількості вміст хрому в сплавах зменшується. Це призводить до підвищення робочої

температури сплавів. Композиції жароміцних сплавів уже не базуються на системі Ni-Cr, а є комплексно легованими системами, в яких вміст хрому знаходиться на рівні двох легуючих елементів (Al, Mo, W, Ti, Nb, Co). Об'ємна частка зміцнювальної γ -фази в таких сплавах доходить до 60 %.

Жароміцність загартованого сплаву та короткочасна міцність – низька. Для отримання високої жароміцності сплав піддають старінню при температурах 700-750 °C з охолодженням на повітрі, також операцію гартування проводять шляхом охолодження металу після високотемпературного нагріву в атмосфері спокійного повітря.

Максимальну міцність сплав отримує після старіння при 700 °C. Старіння при більш низьких температурах сильно уповільнює процес розпаду твердого розчину, старіння при більш високих температурах супроводжується меншим зміцненням через збільшення розчинності титану і алюмінію і відповідного зменшення кількості виділення γ -фази. Крім цього, при високотемпературному старінні (800 – 870 °C) пришвидшується процес розвитку і росту η – фази Ni₃Ti з гексагональної ґраткою.

На властивості металу значно впливає температура гартування. Для температур 600-800 °C найбільша тривала міцність сплаву спостерігається при температурі гартування 1080 °C. Для більш низьких температур (500-600 °C) найкращі властивості забезпечує гартування з 1000 °C. В процесі роботи або тривалого ізотермічного старіння властивості сплаву при температурах 700-750 °C зберігаються досить довгий час на високому рівні, яке забезпечується великою кількістю γ -фази (10-12 % по масі) і малою схильністю до росту її розмірів внаслідок однотипності решіток зміцнювальної фази і твердого розчину і відносно низької дифузійної рухливості атомів алюмінію і титану. Введення бору збільшує тривалу міцність сплаву, цей ефект був виявлений на сплаві ХН77ТЮ.

Жароміцні, технологічні та експлуатаційні властивості жароміцних сплавів в значній мірі залежить від технологій їх виробництва: методом виплавки та кристалізації, технології гарячої обробки тиском, умовами

механічної обробки. Нікелеві сплави виплавляють в відкритих індукційних чи дугових печах, або методом вакуумної індукційної виплавки з наступним переплавом металу в вакуумно-дугових печах. В окремих випадках, коли необхідна висока чистота, метал виплавляється електронно-променевим способом. Також використовуються шихтові матеріали підвищеної чистоти, в яких обмежують вміст сурми, вісмуту, кадмію і т. п.

Характерною особливістю жароміцних сплавів на основі нікелю є сильна хімічна взаємодія рідких компонентів, що призводить до розвитку значної ліквідації при кристалізації. Наслідком ліквідації є пониження пластичності литого металу та анізотропія механічних властивостей прокату та поковок [4].

1.3 Робота лопаток ГТД

Надійність та довговічність газотурбінних двигунів (ГТД) в цілому визначаються спроможністю працювати в найбільш відповідальних і навантажених елементах, якими є робочі лопатки ГТД.

Напруження при виконанні роботи, теплові навантаження, і пошкодження деталей ГТД залежать від режимів роботи двигуна (авіаційний двигун на літаку, корабельний двигун, або стаціонарний двигун).

Так, стаціонарні ГТД працюють протягом сотень тисяч годин на розрахованих режимах при високій економічності і в меншій мірі при змінних режимах.

В той же час транспортні (авіаційні, корабельні та локомотивні) ГТД працюють значний час в умовах змінних режимів навантажень.

Всі пошкодження можна розбити на три великі категорії в відповідності з закономірностями їх виникнення: першочергові, випадкові, які підкоряються закону розподілу.

Першочергове пошкодження – дефект деталі ще до початку експлуатації (різні технологічні дефекти при виготовленні деталі, або порушення нормальних умов зберігання, перевезення тощо).

Випадкові пошкодження виникають непередбаченим чином через чинники, які зумовлює навколишнє середовище, в яких експлуатується двигун. Основна особливість такого пошкодження в тому що, таке пошкодження однаково ймовірне протягом всього періоду експлуатації двигуна, тобто ймовірність появи пошкоджень в двигуні не залежить від періоду його експлуатації. Досвід експлуатації та ремонту одного із типів двигунів показав, що відношення кількості пошкоджень двигуна на лопатках до співвідношення загально обстежених двигунів мало змінюється зі збільшенням напрацьованих годин: 2000 годин – 39%, 2500 годин – 37%, 3000 годин – 39% [5]. Це свідчить про випадковий характер пошкодження лопаток від потрапляння сторонніх предметів, хоча інтенсивність процесу буде залежати від типу двигуна, місця його розташування на літаку, розмірів вхідного приладу і т. д.

Пошкодження, які підкорюються закону розподілу, відбуваються внаслідок зменшення працездатності деяких матеріалів або погіршення властивостей елементів двигуна, які важливі для нормальної роботи двигуна. Процес погіршення може відбуватися внаслідок витирання, корозії або при закінченні ресурсу, коли пошкодження виникають через втому. В цих випадках ймовірність появи пошкоджень підвищується з збільшенням часу експлуатації деталі або елементів двигуна, наприклад, пошкодження турбінних лопаток в результаті тривалої роботи при високій температурі [6, 7, 8, 9].

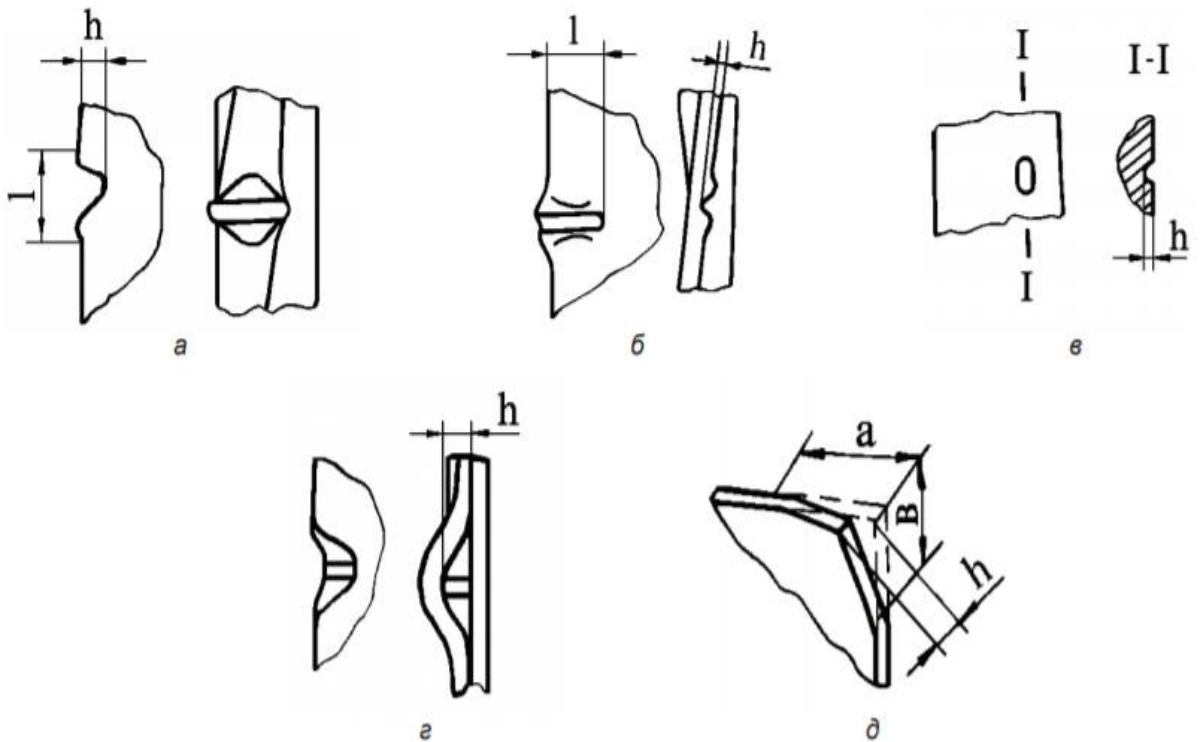
Поява сколів біля основи лопаток або на вхідних або вихідних кромках більш небезпечно, чим у зовнішніх кінцях лопаток.

В авіаційній промисловості діє стандарт [10], який застосовується для визначення механічних пошкоджень, допустимих при експлуатації або які підлягають виправленню при різних видах ремонту, або заміна пошкоджених лопаток на двигуні.

Стандарт чітко визначає величини механічних пошкоджень, які допускаються при експлуатації. Стандарт нормує величини пошкоджень, які підлягають ремонту і зони які недопустимі на лопатках під час експлуатації

Пошкодження відрізняються не тільки розмірам, но і формой, а також місцем розташування [11].

На рис. 1.1 показані приклади вимірювання величини пошкоджень.



а – вм'ятина на вхідній площині (лобовий удар); б - вм'ятина на вхідній площині по дотичній до радіусу заокруглення площини; в - вм'ятина на профільній частині пера; г – погнутість; д – відхил кута лопатки

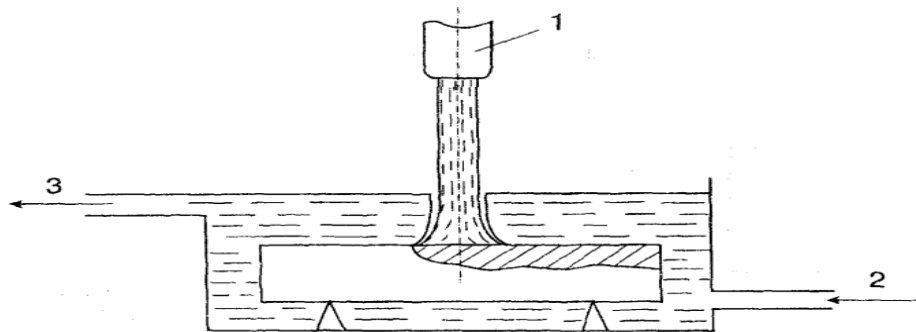
Рисунок 1.1 - Види пошкоджень лопаток від попадання зайвих предметів [\[11\]](#)

1.4 Плазмове азотування як метод поверхневого зміцнення

Іонно-плазмове азотування – це різновид хіміко – термчної обробки деталей машин, інструменту, штампової та ливарної оснастки, яка забезпечує дифузійне насичення поверхневого шару сталі азотом в азото-водородній плазмі при температурах 400–700°C. Принцип дії іонно плазмового азотування полягає в тому, що в розрядженому ($P = 150\text{--}1000$ Па) азотовмісному газовому середовищі між катодом – деталями і анодом – стінками вакуумної камери – викликається аномальний тліючий розряд, який утворює активне середовище (іони, атоми), що забезпечує формуванню азотованого шару [\[12\]](#). Технологічними факторами, які впливають на ефективність іонного азотування, являються температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрати робочої газової суміші.

Температурний діапазон іонного азотування при зміцненні сталей знаходиться в межах 400–700 °C. Обробка при температурах нижче 500 °C особливо ефективна при зміцненні виробів з легованих сталей тому, що значно підвищує їх експлуатаційні властивості при збереженні твердості серцевини на рівні 55–60 HRC. ПІА сприяє значному підвищенню зносостійкості та опору втомленості. Змінюючи склад газу, тиск, температуру і час витримки можна отримати шари необхідної структури та фазового складу. Оптимізація властивостей зміцненої поверхні забезпечується за рахунок необхідного поєднання нітридного й дифузійного шарів. В наслідок іонного азотування суттєво підвищуються наступні характеристики виробів: зносостійкість, втомна міцність антизадирні властивості, теплостійкість, корозійна стійкість.

Крім того, в порівнянні з газовим азотуванням в печі, іонно – плазмове азотування забезпечує: скорочення тривалості обробки в 2–5 разів, як за рахунок скорочення часу нагріву і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки; зниження крихкості зміцненого шару; скорочення витрат робочих газів в 20–100 разів; скорочення витрат електроенергії в 1,5–3 рази; виключення операції депасивації; зниження деформації настільки, що виключається фінішне шліфування; простоту й надійність екранного захисту від азотування поверхонь, що не зміцнюються; покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва [12].



1 – плазмотрон; 2 – ввід води; 3 – відвід води;

Рисунок 1.2 – Схема процесу плазмового зміцнення [13]

Як показано на рисунку 1.2, при русі плазмової струї відносно деталі поверхня нагріта до температури структурних перетворень зразу охолоджується рідиною. Якщо використовувати не воду а активні рідики середовища типу розчинів різних солей, то поверхня може додатково взаємодіяти з рочином [13].

Встановлено, що коефіцієнт зосередженості та максимальний тепловий потік в центрі п'ятна при нагріві при обробці в воді підвищуються приблизно на 20 % [14]. Площа п'ятна нагріву зменшується на такуж величину в порівнянні з плазмовим гартуванням на повітрі. При плазмовом зміцненні в рідкому середовищі швидкість охолодження підвищується в п'ять-шість раз, в наслідок чого максимальна твердість сталей підвищується до 20% в порівнянні з зміцненням на повітрі [13].

1.5 Аналіз літературних даних та постановка задачі

З аналізу літературних даних витікає, що однією із актуальних проблем ціленаправленої дії на властивості матеріалу виробу, який знаходяться в областях дії критичних загрузок, що приводять до його руйнування або втрати робочих характеристик. Технології дифузійного насиченням поверхневих слоїв (хіміко – термічна обробка є ефективним методом зміцнюючої обробки деталей складної геометричної форми.

Одне із напрямлень її вирішення заключається в обробці поверхневих слоїв деталей різними технологічними методами. В якості таких пропонують різні методи хіміко-термічної обробки, об'ємну та поверхневу плазмову обробку. Тому, може бути цікавим вивчення іонно-плазмового азотування на таку важливу характеристику для багатьох вировів, що працюють в умовах знакозмінним навантажень, як втомна міцність.

Метою даної роботи є підвищення втомної міцності жаростійкого нікелевого сплаву ЧС-70 шляхом іонно-плазмового азотування.

У відповідності до мети роботи були вирішені такі задачі:

- Дослідження хімічного та фазового складу, структури жароміцного нікелевого сплаву ЧС-70 після іонно-плазмового азотування;
- Вивчення розподілу мікротвердості по товщині зразка після іонно-плазмового азотування;
- Визначення впливу іонно-плазмового азотування на втомну міцність жароміцного нікелевого сплаву ЧС-70;
- Аналіз розташування осередків тріщиноутворення в зламі зразків з ЧС-70 після їх втомного руйнування.

В подальшому дані роботи будуть використані для визначення впливу зміцнюючи обробок на втомну міцність лопаток газотурбінних двигунів, вироблених з жароміцного нікелевого сплаву ЧС-70.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Обґрунтованість результатів, отриманих під час дослідження процесів, які протікають при іонно-плазмового азотування, а також при вивченні впливу ППА на втомну стійкість жароміцного нікелевого сплаву ЧС70, забезпечується відповідністю об'єктів експериментального дослідження та застосуванням сучасних методів досліджень. Для контролю отриманих даних було використано сучасні методи дослідження, що застосовуються в галузі фізичного матеріалознавства.

2.1 Об'єкт дослідження та технологія обробки

Сплав ХН58КВТЮМБЛ застосовується для виготовлення литтям по виплавляємим моделям і вакуумним способом деталей машин з підвищеною тривалою міцністю і жаростійкістю до +900 °С, стійкістю до окислення при підвищених температурах (лопаток турбін наземних ГТД) [14].

Жаростійкість металу обумовлена досить великою кількістю Сг (до 16,5% мас.). Наявність вольфраму гарантує жароміцність та зменшує дифузію у сплаві. Сплав має високу тривалу міцність і жаростійкість при температурах до 1173 К. зокрема має високу стійкість до сульфідної корозії та термічну стійкість від окиснення. Однак при тривалій експлуатації в поверхневих шарах відбуваються структурно-фазові зміни. Більш наглядний хімічний склад наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву ЧС-70

	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W	Al
ТУ14-1-3658-83	<0,3	4,1-5,0	15-16,7	<0,5	10-11,5	Залишок	0,1-0,3	1,5-2,0	4,5-6,0	2,4-3,2

Використаний	0,136	4,758	15,398	0,42	10,432	60,203	0,39	2,041	5,222	2,4
--------------	-------	-------	--------	------	--------	--------	------	-------	-------	-----

2.2 Технологія іонного азотування

Технологія іонного азотування є ефективним методом зміцнюючої обробки деталей складної геометричної конфігурації з легованих конструкційних сталей, таких як шестірні, зубчасті вінці, вали, муфти тощо.

Ті технології іонного азотування, що на цей час застосовуються, мають суттєві недоліки: високі питомі потужності споживання електроенергії на 1 кг виробів та відносно тривалий цикл технологічного процесу.

Зразки, що піддавалися технології іонного азотування, були оброблені в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України за принципово новою технологією іонно-плазмового термоциклічного азотування [\[15-17\]](#).

Технологія іонно-плазмового азотування має такі переваги: нагрівання відбувається за рахунок енергії розряду, що тліє; при циклічному нагріванні та охолодженні деталі в поверхневому шарі виникають термічні напруги, які у два-три рази прискорюють дифузійні процеси, і, відповідно, скорочується час технологічної обробки; форма та розміри деталі, а також чистота її поверхні залишаються без змін, що виключає необхідність фінішної обробки поверхні. Циклічний характер швидкісного дискретного енерговведення зменшує витрати електроенергії в - 10 разів.

Для зміцнення поверхневих шарів деталей використано діючий комплекс ПТА "ВІПА-І", що складається з вакуумної камери та автоматизованої системи контролю та управління [\[15\]](#). Поверхню деталі обробляли шляхом подачі пульсуючої напруги та отримання пульсуючих термоциклів, що значно підвищує швидкість дифузного насичення деталі азотом [\[15\]](#).

Нагрів зразка здійснювали за рахунок енергії тліючого розряд. При цьому нагрівається поверхневий шар без прогріву серцевини до величини

температури поверхні, незважаючи на тривалість іонно-плазмового азотування. Це визначається умовами технологічного процесу у вакуумному середовищі.

Параметри режимів технологічного процесу такі: температура нагрівання зразка 773 К. при цьому величина зміни (девіація) температури становить 50 К. тобто. 77 К - 50 К. і далі після досягнення 823 К автоматично знижується до вихідної 773 К. тобто. цикл зміни 50 К: робочий тиск у камері 200 Па: час обробки поверхні зразків 5 год: співвідношення реакційних газів у камері: аргону 60 та азоту 40%. Насичення поверхні зразків відбувалося рівномірно по всьому периметру, що забезпечує рівномірну глибину дифузійного шару зразку.

2.3 Мікроструктурний і дюрOMETричний аналізи

ДюрOMETричні методи дослідження широко застосовують при вивченні впливу різноманітних чинників на кінетику росту, фазовий склад і структуру, вплив різноманітних технологічних факторів на стан поверхневого шару, мікротвердість та інше.

Дослідження і реєстрацію мікроструктури зразків здійснювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при збільшенні $\times 520$ із використанням цифрової камери "CASIO" з розширюваною спроможністю 2100000 PIX.

Технічні характеристики мікротвердоміру ПМТ-3:

- збільшення мікроскопу – 138 та 520;
- ціна поділки шкал барабанчиків мікрометричних гвинтів координатного переміщення, мм – 0,01;
- межі координатного переміщення предметного столику у двох взаємно перпендикулярних напрямках, мм – від 0 до 10.

Зразок, або виріб встановлюють на опорному столику приладу так, щоб в процесі випробування він не зміщувався і не прогинався. Поверхня, на якій наносять відбитки, повинна бути перпендикулярна до всього наконечника.

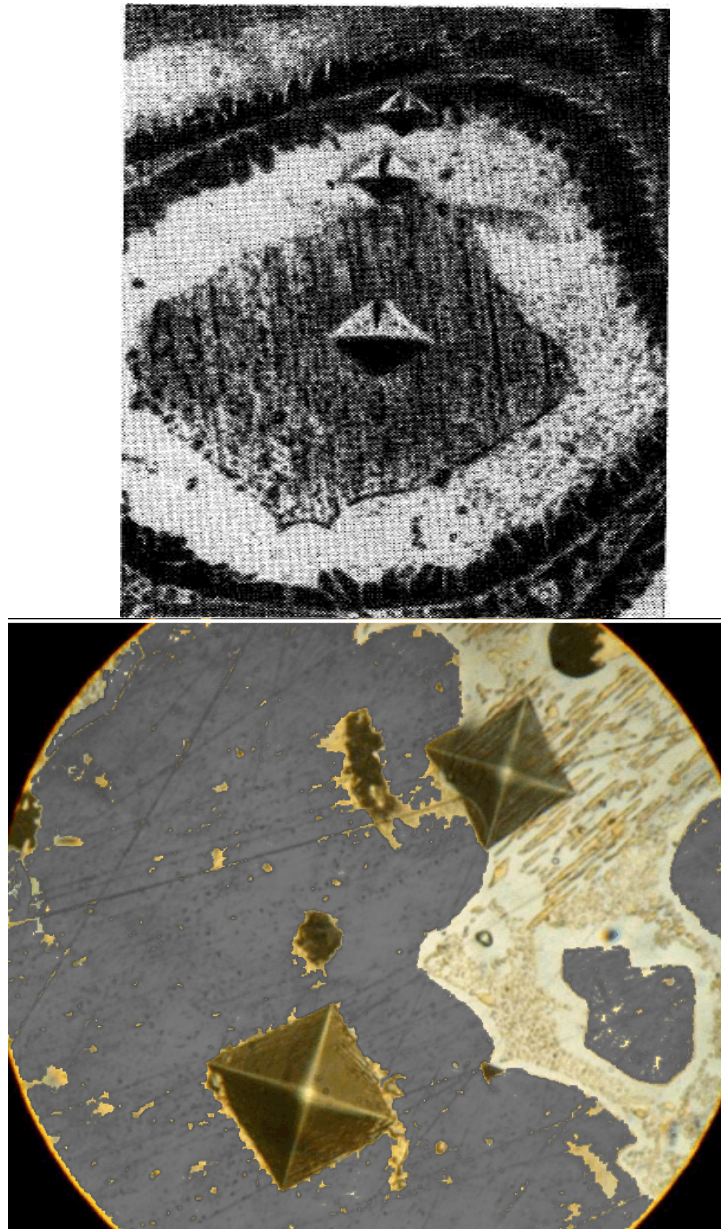
Місце розташування відбитку вибирають так, щоб відстань від його центру до краю не менше подвійної довжини діагоналі відбитка. При визначенні твердості окремих структурних складових сплаву за край зерна. Стандартизовані наступні навантаження: 1, 5; 10; 20; 50; 100; 200 гс (0,049; 0,098; 0,196; 0,49; 0,98; 1,96 Н). Величину навантаження в разі випробування однорідного матеріалу, вибирають, виходячи з очікуваної довжини діагоналі відбитка, яка повинна бути не більше півтори товщини зразка або шару покриття.

У разі випробування неоднорідного за структурою матеріалу величину спочатку мети досліджень. Якщо необхідна оцінка середньої мікротвердості матеріалу, то розмір діагоналі відбитка повинен бути у порівнянні з розмірами структурних складових сплаву. Випробування такого неоднорідного металу повинні бути при правильному виборі навантаження давати однакові результати.

Якщо кінцевою метою випробування є оцінка твердості окремих структурних складових, то величину розрахунку, щоб розмір діагоналі відбитка був досить малий у порівнянні з розмірами зерен. Навантаження прикладають плавно, без поштовхів, повільно, щоб швидкість впровадження піраміди не відбивалася на даних.

Тривалість витримки під навантаженням повинна становити не менше 5 с. Приклади характеру на рис. 2.1.

Для визначення твердості зразка, або випробування носять, як правило, не менше трьох відбитків, а інколи і більше. Якщо спостерігається значне розсіювання результатів, то шукають причину.



а)

б)

Рисунок 2.1 – Відбитки на сталі (а) та на дослідному нікелевому сплаві (б)

Діагоналі відбитків вимірюють за допомогою кінескопа. Для цього спочатку шляхом обертання барабану мікрометричного окуляра підводять перехрестя рухомої сітки до лівих граней відбитку (рис 2.2 а). Фіксують положення поділок мікрометричного барабанчика.

Далі перехрестя переводять до протилежних граней. Знову фіксують положення поділок мікрометричного барабанчика. Знаходять різницю кількості поділок і знаючи ціну поділки вираховують довжину діагоналі відбитка. Далі

повертаючи окуляр на 90° , визначають також довжину другої діагоналі і обчислюють її середню довжину (рис 2.2 б).

Мікротвердість обчислюють за формулою (2.1):

$$HV = 1,854 \cdot P/d^2, \quad (2.1)$$

де P – величина навантаження, $\text{кг} \cdot \text{с}$;

d – довжина діагоналі, мм^2 .

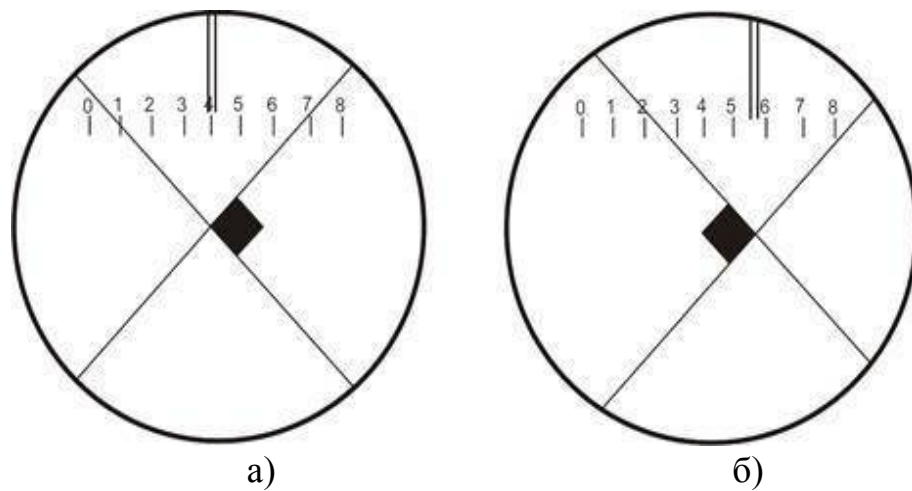


Рисунок 2.2 – Схема вимірювання довжини діагоналі відбитка окулярним мікрометром

Було обрано навантаження 50 Н.

2.4 Випробування втомної міцності

Вплив іонно-плазмового азотування на опір втоми сплаву ЧС-70 досліджували на зразках із круглим поперечним перерізом типу 1 згідно [18] (рис. 2.3).

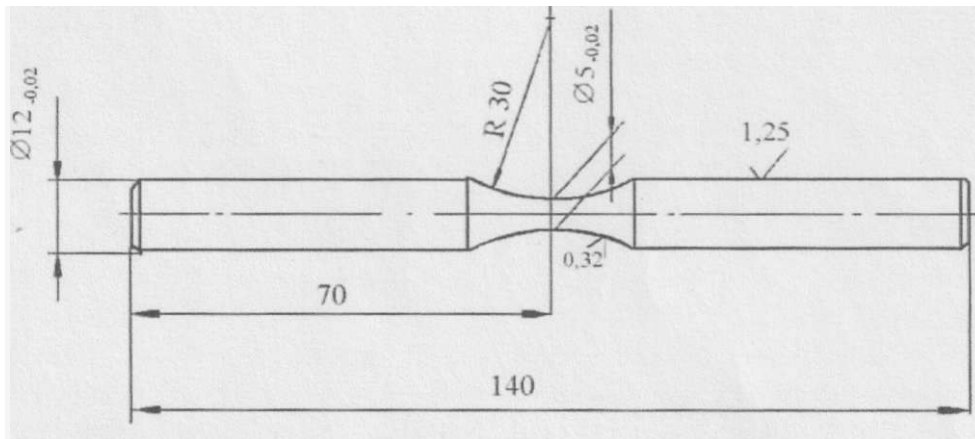


Рисунок 2.3 – Зразок для випробувань на втомну міцність.

Вибір цього типу зразків обумовлений тим, що при випробуванні локалізується місце руйнування при консольному закріпленні на вібростенді, що зручно для проведення хіміко-термічної обробки, так як виключається можливість прояву різних крайових ефектів.

3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Вплив зміцнюючої обробки на хімічний склад поверхневого шару нікелевого сплаву ЧС -70

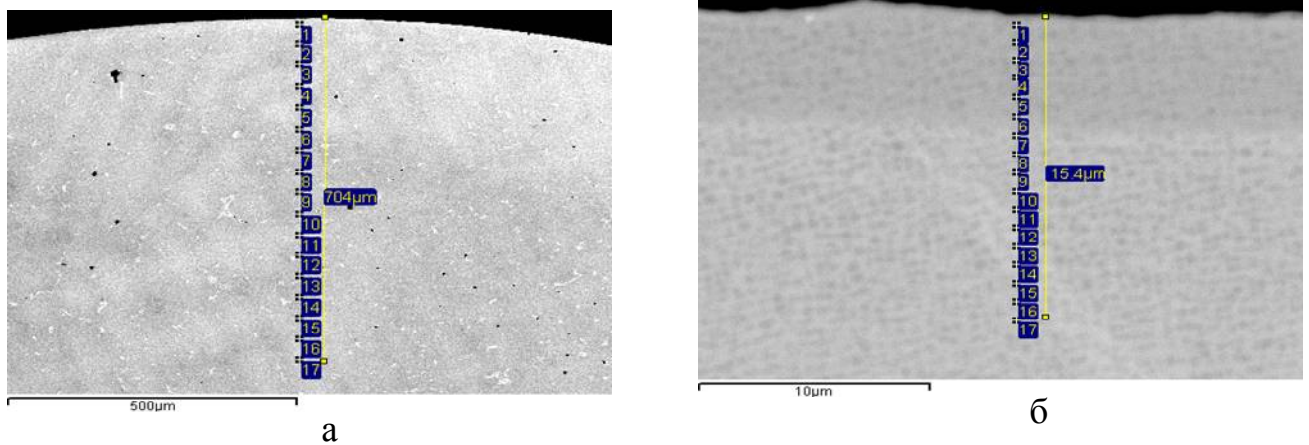
Однією з актуальних комплексних та економічно вигідних задач сучасного матеріалознавств є продовження ресурсу турбінних лопаток газотурбінних установок, виготовлених з дорогих жароміцних нікелевих сплавів, шляхом відновлювальної технології, що забезпечує покращення функціональних характеристик структури поверхні деталей у поєднанні з заходами щодо підвищення матеріало- та енергозбереження, забезпечення екологічності та безпеки ремонтних технологій. Лопатки турбіни високого тиску (ТВД) є найвідповідальнішими деталями газотурбінних двигунів. Вони експлуатуються в складних умовах за високих температур, великих механічних навантажень, які при накладенні відцентрових сил, впливу активних газових середовищ можуть досягати критичних значень [19].

Великий вплив на працездатність має ушкодження лопаток. Поява тріщин у процесі експлуатації, збіднення поверхневого шару легуючими елементами (хромом, титаном, алюмінієм, бором) здатні призводити до істотної зміни структури, погіршення властивостей матеріалу, а надалі й до руйнування. На стан поверхневого шару лопаток впливають склад робочого газового середовища та швидкість її потоку. Тому працездатність пов'язана з напрацюванням двигуна в процесі експлуатації, особливо коли деталі працюють при високих температурах (800 - 850)°С. Застосування жаростійкого покриття підвищує працездатність та експлуатаційну стійкість.

В роботі розглянуто вплив іонно-плазмового азотування (ІПА) на хімічний склад та мікротвердість сплаву ЧС-70 (ХН58КВТЮМБЛ)

Після іонно-плазмового азотування мікроструктурно виявляється тонкий шар, що відрізняється від основи відтінком (рис.3.1). Треба відзначити, що структура поверхневого шару після іонно-плазмового азотування, значно більш гомогенна, ніж вихідна. Вона наближена до структури загартованого та не зістареного сплаву. Товщина дифузійного шару після плазмового азотування складає 8-9 мкм.

Розподіл мікротвердості за товщиною представлено на рис.3.2



а-вихідний

б - плазмове азотування

Рисунок 3.1 – Електронні мікрофотографії поверхневого шару сплаву ЧС70

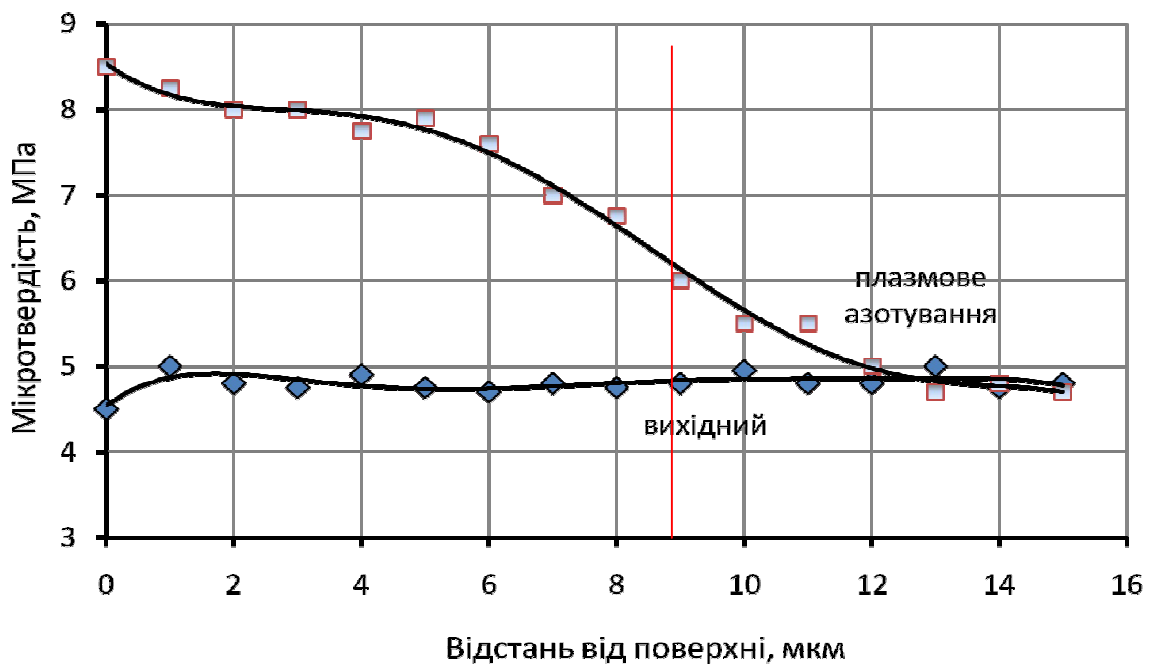


Рисунок 3.2 – Розподіл мікротвердості по товщині поверхневого шару сплаву ЧС70 .

Ефекти плазмової обробки досягаються як тепловою, так і механічною дією плазми (бомбардуванням виробу частинками плазми, що рухаються з дуже високою швидкістю - так званий швидкісний натиск плазмового потоку). При цьому активується як поверхня, що насичується, так самі атоми активного азоту отримують більшу енергію та здатність дифундувати в основу. Ці ефекти також вносять свою долю в підвищення мікротвердості поверхневого шару.

Розподіл елементів по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70 після іонно-плазмового азотування представлений на рис. 3.3-3.12 та в табл.3.1,3.2.

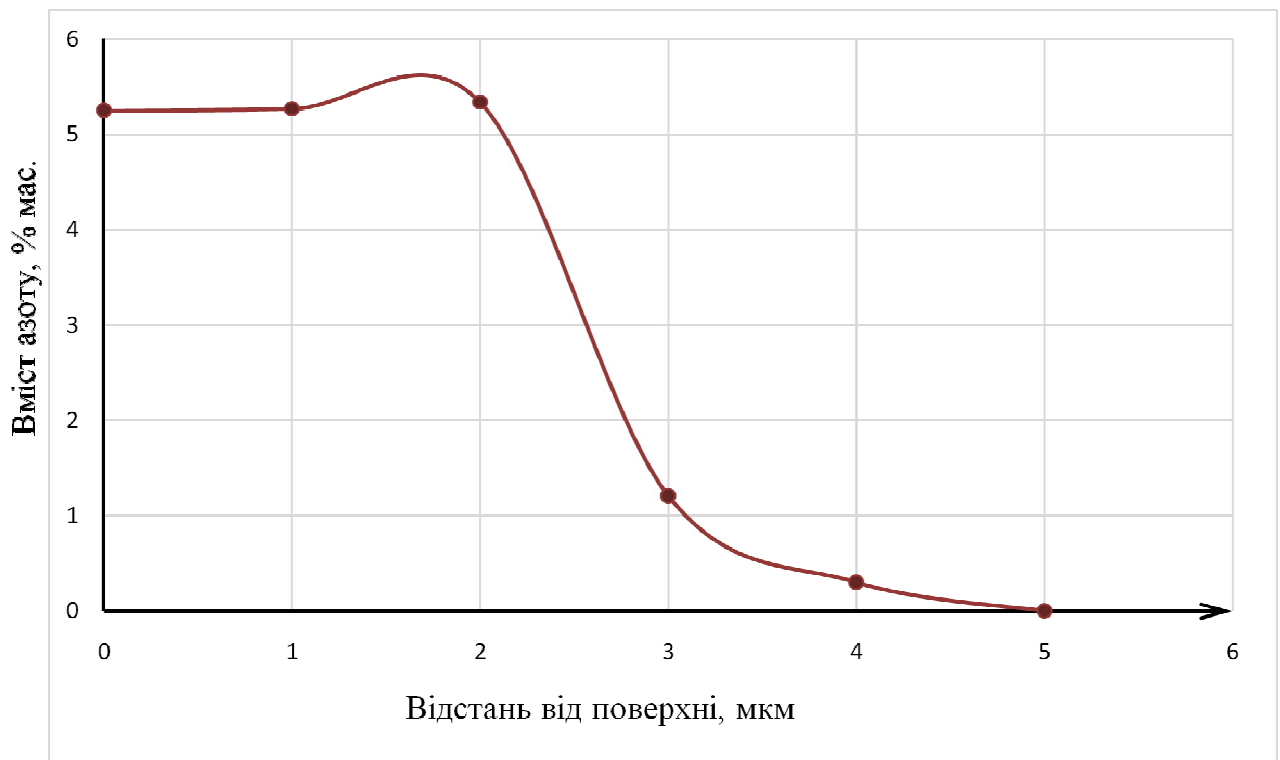


Рисунок 3.3 - Розподіл вмісту азоту по товщині зміцненого іонно-плазмового азотування шару сплаву ЧС-70

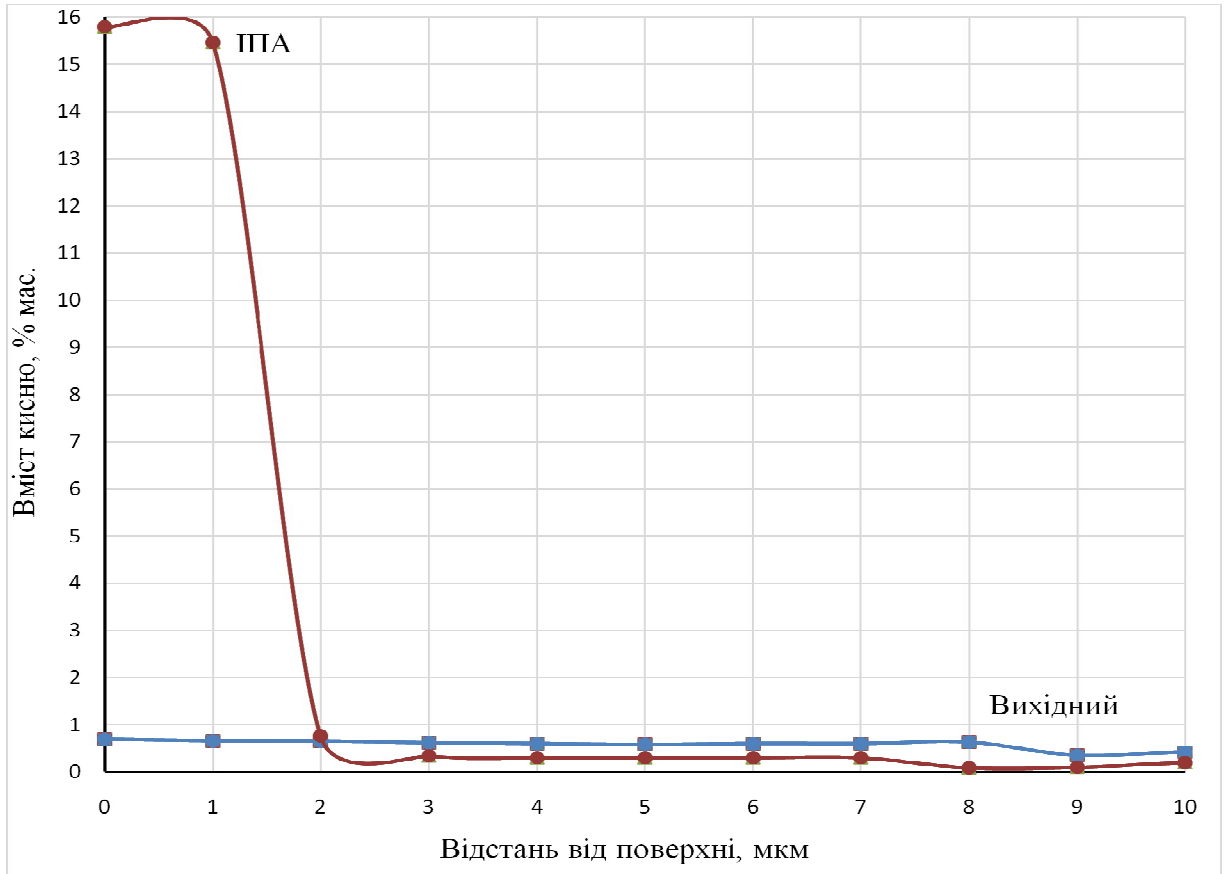


Рисунок 3.4 - Розподіл вмісту кисню по товщині поверхнього шару сплаву ЧС-70

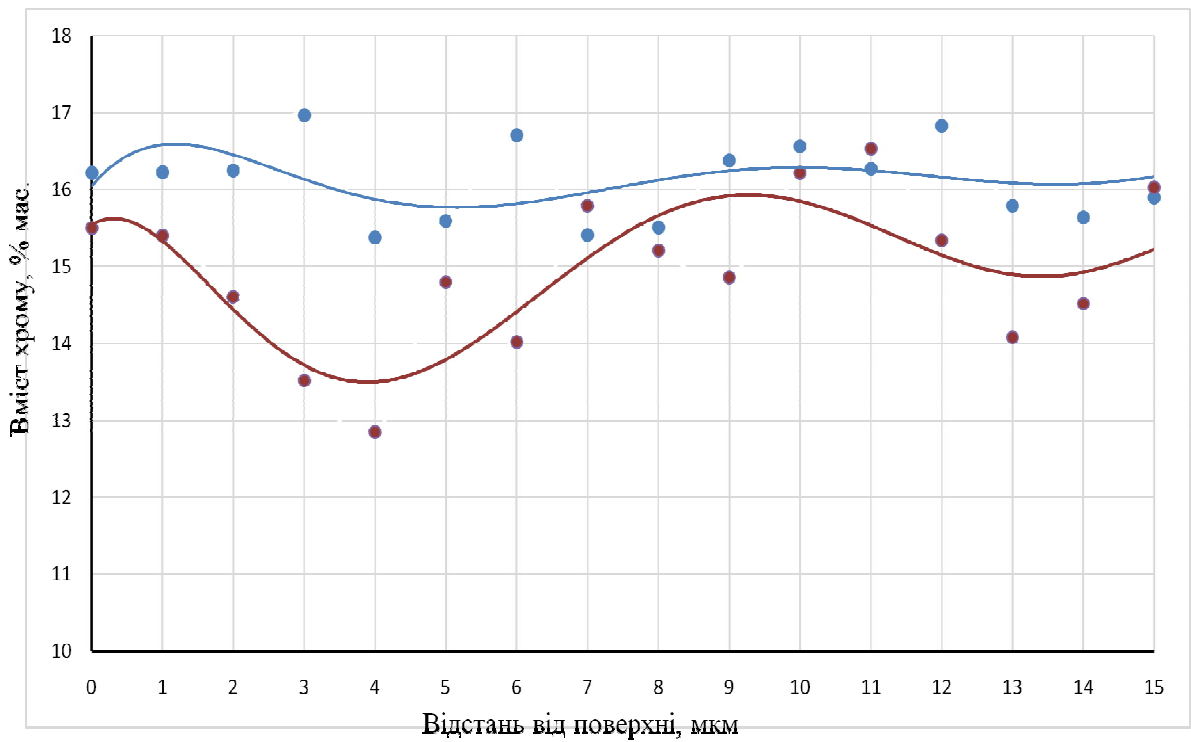


Рисунок 3.5 - Розподіл вмісту хрому по товщині поверхнього шару сплаву ЧС-70

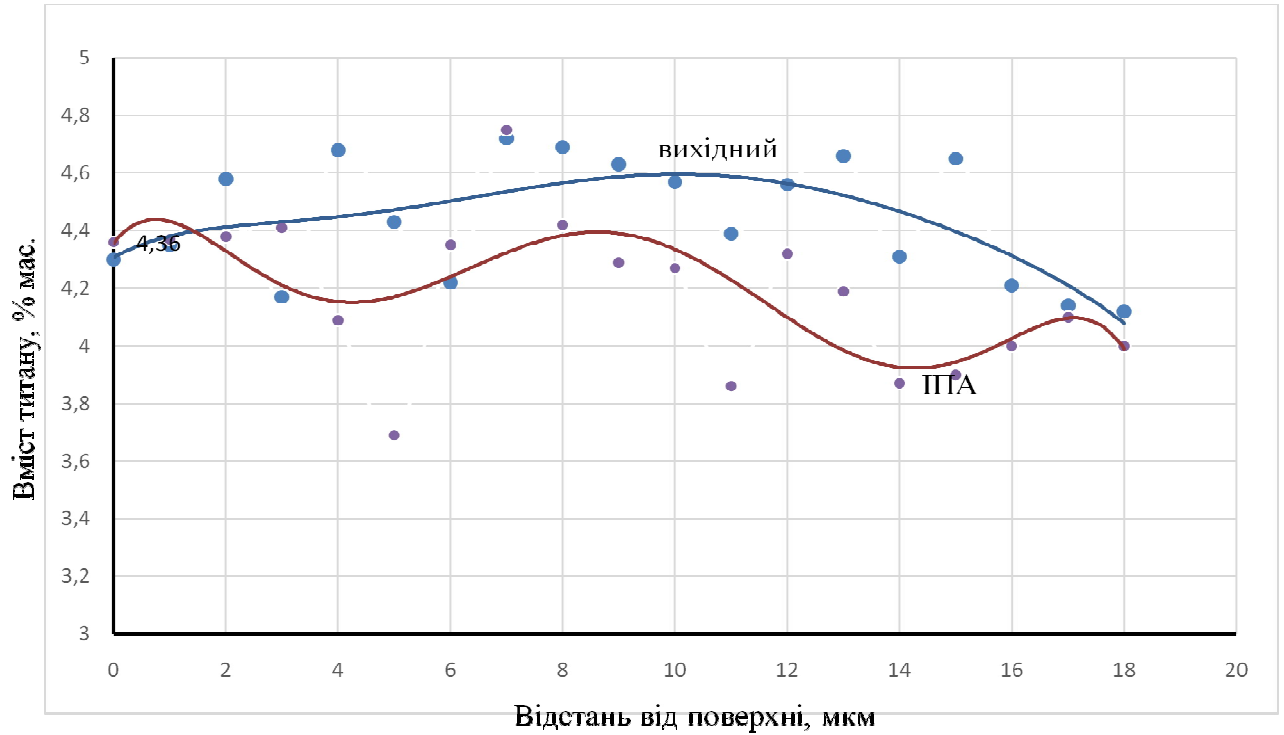


Рисунок 3.6 - Розподіл вмісту титану по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

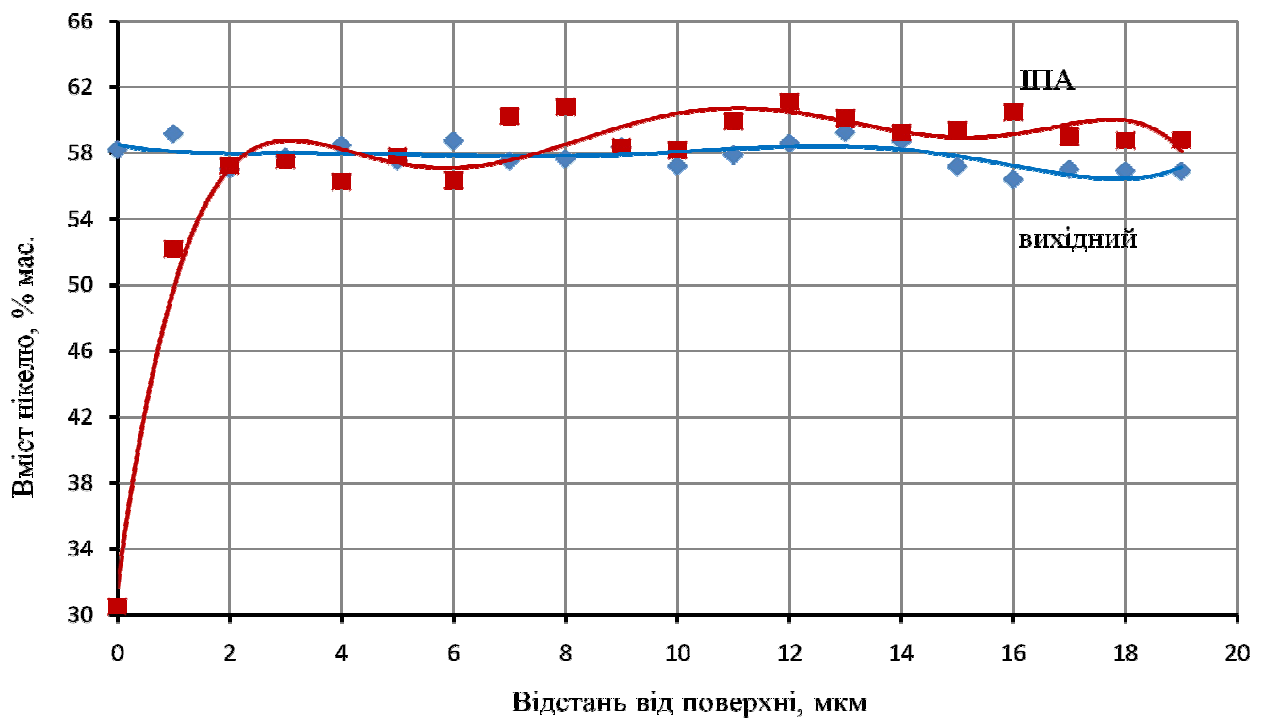


Рисунок 3.7 – Розподіл вмісту нікелю по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

Таблиця 3.1 - Розподіл вмісту алюмінію по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

Вид обробки	Вихідний	Іонно-плазмове азотування
Товщина зміцненого шару, мкм		
0	2,4	2,41
1	2,41	2,43
2	2,47	2,31
3	2,5	2,44
4	2,64	2,37
5	2,19	1,91
6	2,43	2,25
7	2,6	2,55
8	2,38	2,59
9	2,3	2,22
10	2,32	2,51
11	2,43	2,47
12	2,34	2,25
13	2,46	2,14
14	2,76	2,46

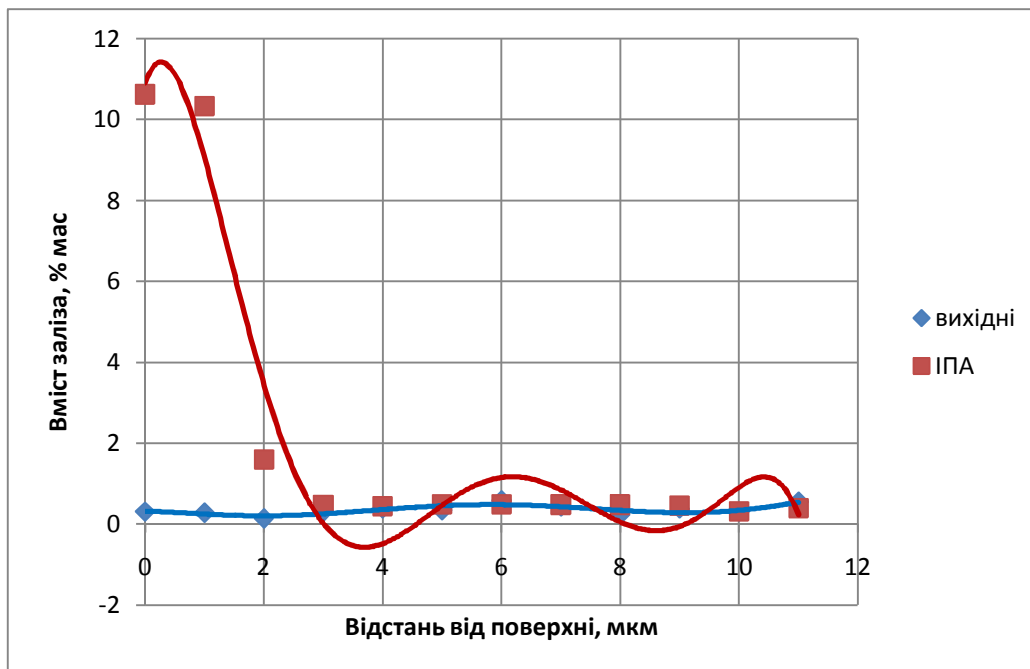


Рисунок 3.8 - Розподіл вмісту заліза по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

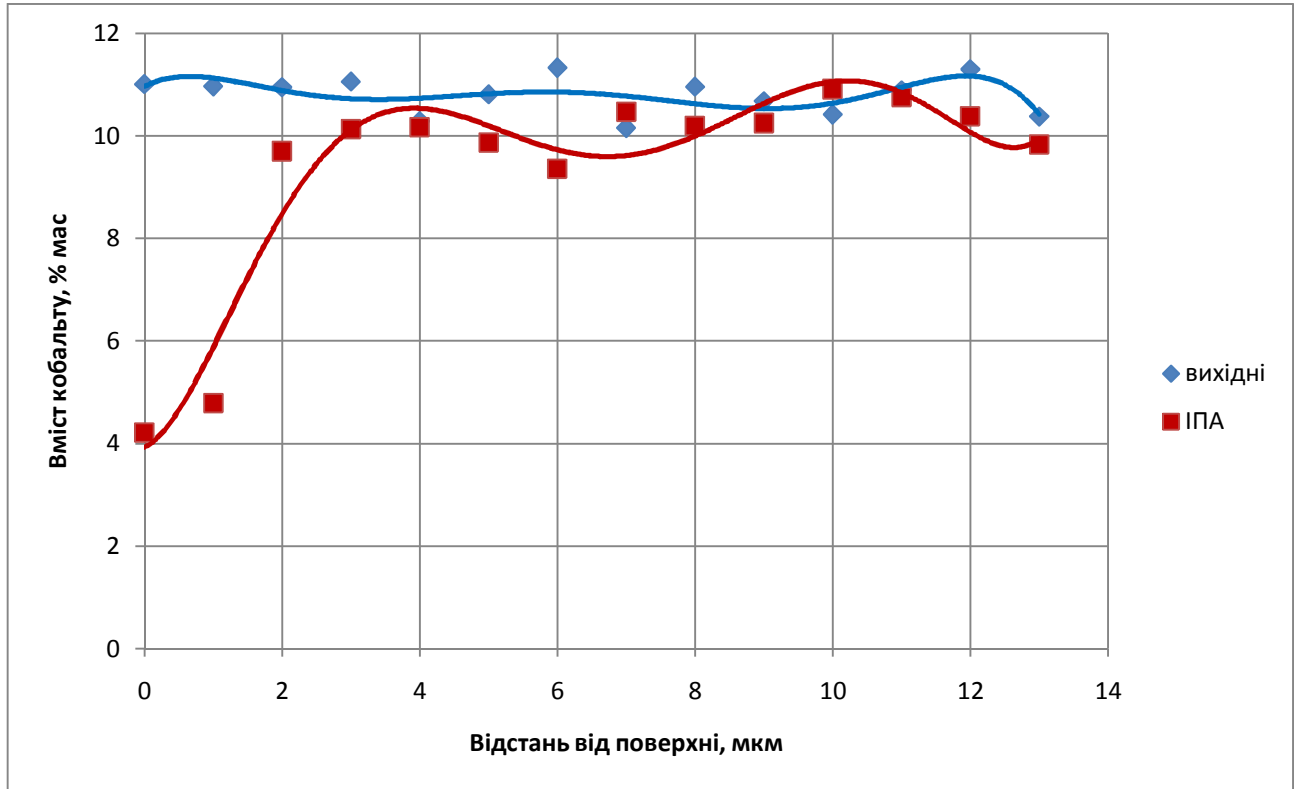


Рисунок 3.9 – Розподіл вмісту кобальту по товщині поверхнього шару сплаву ЧС-70

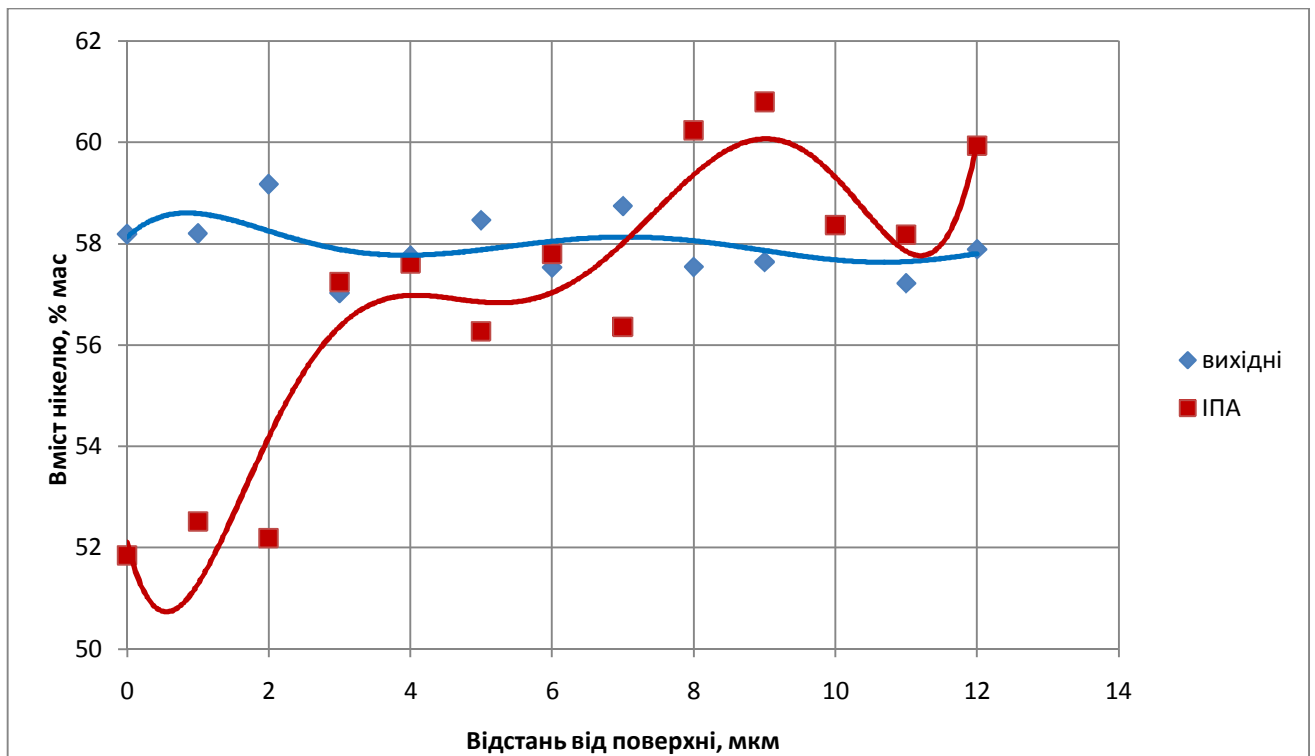


Рисунок 3.10 – Розподіл вмісту нікелю по товщині поверхнього шару сплаву ЧС-70

Таблиця 3.2 – Розподіл вмісту ніобію по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

Вид обробки	Вихідни й	Іонно-плазмове азотування
Товщина зміцненого шару, мкм		
0		
1	0,1	0,27
2		0,12
3	0,34	0,16
4	0,83	0,64
5	0,61	0,4
6		0,22
7	0,41	0,11
8	0,44	0,06
9	0,47	0,02
10	0,45	0,26
11	0,72	0,24
12	0,15	0,36
13	0,24	0,42
14		0,39
15	0,31	0,07
16	0,02	0,35

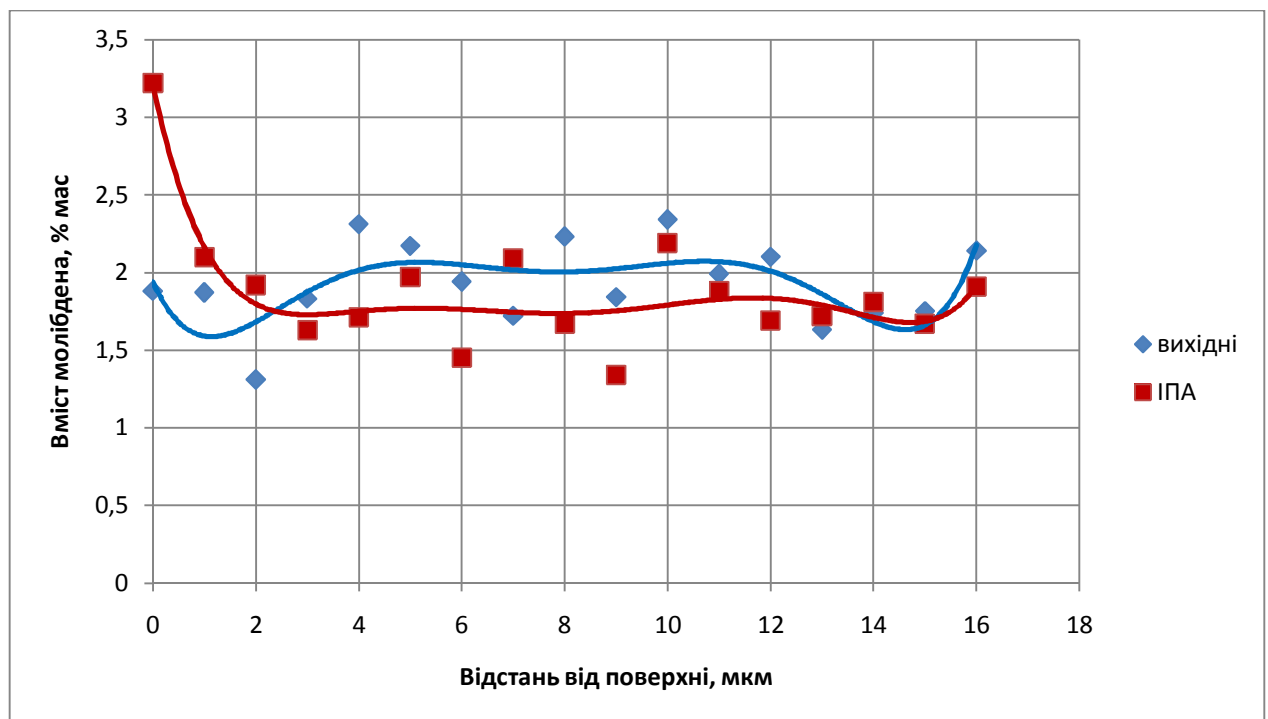


Рисунок 3.11 – Розподіл вмісту молібдену по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

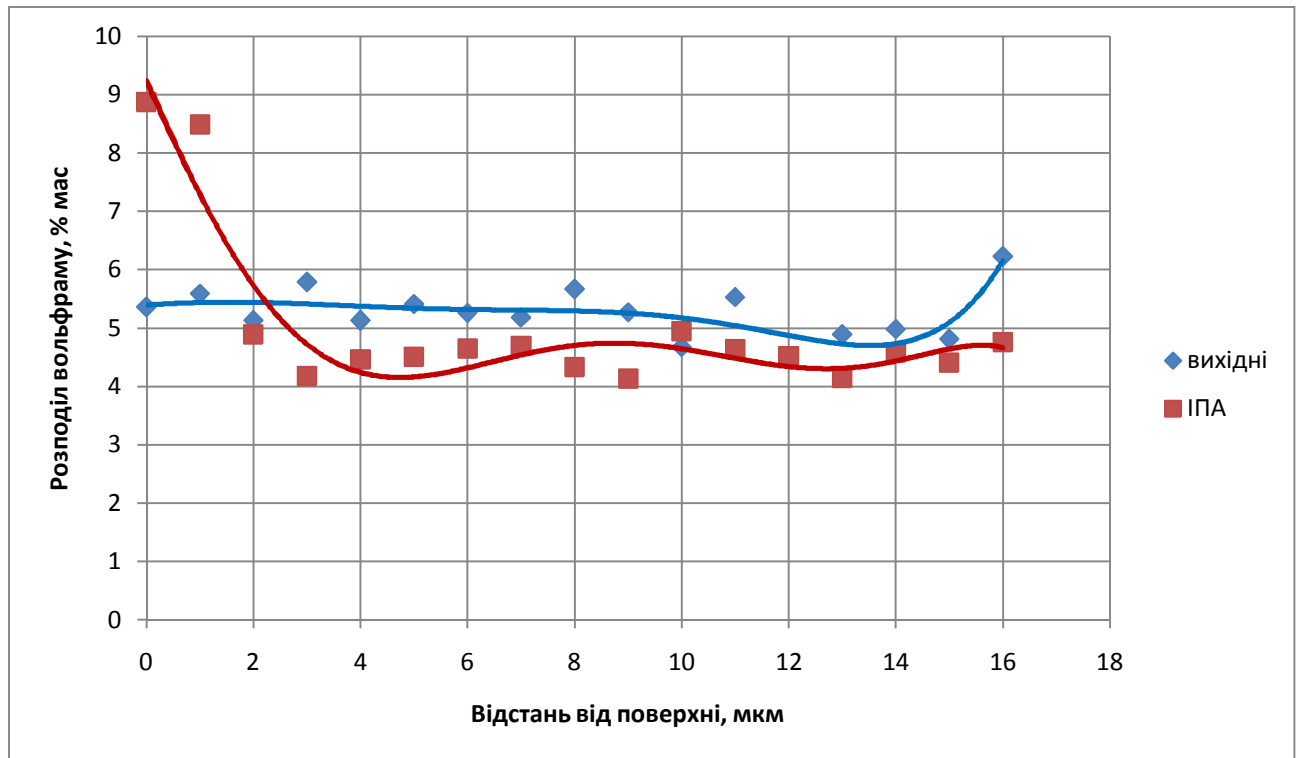


Рисунок 3.12 – Розподіл вмісту вольфраму по товщині поверхневого шару сплаву ЧС-70

У відповідності до ТУ 14-1-3658-83 в сплаві ЧС-70 (ХН58КВТЮМБЛ) може бути присутнім не більше 0,01 % мас. азоту. Зміцнений шар, що сформувався при іонно-плазмовому азотуванні характеризується вмістом азоту до 5,34 % мас., в тонкому шарі товщиною 2-3 мкм. В цій же зоні високий вміст кисню – до 15,8 % мас. (рис.3.2). Виходячи з того, що зона підвищеної мікротвердості зберігається на відстані 8-9 мкм від поверхні, можна припустити зміцнюючий вплив плазмової обробки на її властивості.

Алюміній, який разом з титаном утворює зміцнюючу γ' -фазу $Ni(Al,Ti)$, після іонно-плазмового азотування не перерозподіляється і по всій товщині зміцненої зони міститься в кількості, що передумовлена технічними умовами (1,5-2,5) % мас. (табл.3.1, рис.3.6).

Треба відзначити особливості поведінки хрому та титану при ІПА (рис.3.5, 3.6). Вміст цих елементів у зміцненому шарі мало відрізняється від вихідного. Але є дві ділянки, де їх вміст падає: на відстані 3-5 мкм вміст Cr- до 12,85%, Ti – до 3,6 % мас.; на відстані 12-14 мкм вміст Cr падає до 12,85%, Ti –

до 3,6 % мас. За ТУ 14-1-3658-83 в сплаві ЧС 70 (ХН58КВТЮМБЛ) повинно бути вміст Cr- до 15-16,7 %, Ti –до 4,5-5 % мас. В цих же зонах підвищений вміст нікелю. В той же час на поверхні значно зменшена концентрація нікелю та виявлено залізо –майже 10,5 % мас. (табл.2) Для даного сплаву вміст заліза обмежується 0,5 % мас. Можливо залізо поступило з матеріалу обладнання та в деякій мірі замістило нікель елементи. При іонно-плазмовому азотуванні в цьому тонкому приповерховому шарі спостерігається різкий спад кобальту (рис. 3.9). Скоріш за все це можна пояснити деяким випаровуванням в результаті нагрівання при плазмовій обробці та частковим відтисненням цих елементів від азотованого шару. Відомо, що нікель та кобальт, на відміну від вольфраму та молібдену, мають дуже малу спорідненість до азоту та кисню.

Ніобій, який входить до складу γ -фази, твердого розчину на основі нікелю, як стабілізуюча та зміцнююча домішка та утворює в невеликій кількості карбід, як у вихідному, так і в зміцненому зразку, розташовується не зовсім рівномірно (табл.3.5). В деяких об'ємах його не виявлено. Така нерівномірність розташування скоріш за все й пов'язана з великою карбідоутворюючою здатністю та знаходженням його саме в сполуках. Але в цілому кількість ніобію не виходить за межі, приведені в технічних умовах.

Ще однією особливістю хімічного складу шарів, отриманих при іонно-плазмовому азотуванні є підвищений вміст важких металів Mo та W. В тонкому шарі біля 3 мкм вміст молібдену до 3,5 % мас. проти 2 % мас. за ТУ, і вольфраму до 8,9 % мас. проти 4,5-6 % мас. за ТУ. Можливо концентрація цих елементів так підвищилася за рахунок виносу атомів нікелю, кобальту, хрому та титану.

Таким чином шари, отримані із застосуванням іонно-плазмового азотування містять азот та кисень. Елементи, що входять в склад сплаву перерозподіляються незначно. Не зважаючи на те, що мікроструктура поверхневої зони сплаву після іонно-плазмового азотування наближена до загартованої, тобто має в своєму складі значно менше зміцнюючих фаз, її

мікротвердість майже в 2 рази вища. Це можна пояснити саме утворенням твердого розчину азоту та кисню в нікелі та впливом дії плазми.

3.2 Результати випробувань втомної міцності сплаву ЧС - 70

Випробування на втому проводили на установці на основі електродинамічного вібратора за методикою, описаної в [20].

Вплив технологічної обробки іонно-плазмового азотування поверхні зразків оцінювали при порівняльних випробуваннях на втому цих зразків та зразків у вихідному стані.

Результати випробувань зразків із різним станом поверхні наведено на рис. 3.13. Характеристики їхньої статистичної обробки [21], отримані при побудові кривих втоми (рис. 3.13) у вигляді лінії регресії

$$\sigma_a = A + B \lg N$$

де σ_a - амплітуда напруги; N - число циклів до руйнування при σ_a ; A і B коефіцієнти лінії регресії, визначені при мінімізації квадратів відхилень величин $\lg N$, представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Рівняння кривих втоми зразків

Зразок	$n_{\text{сум}}$ / $n_{\text{руйн.}}$	$r_{i/i}$	$A + B \lg N$		σ_{-1} , МПа на базі 10^7 циклів
			A	B	
Вихідний	11/8	-0,7281	817,38	-63,87	380
Після ША	10/7	-0,5977	661,85	-21,76	500

де $n_{\text{сум}}$ – кількість випробувань зразків; $n_{\text{руйн.}}$ – кількість зруйнованих зразків; $r_{i/i}$ – коефіцієнт кореляцій; σ_{-1} – межа витривалості.

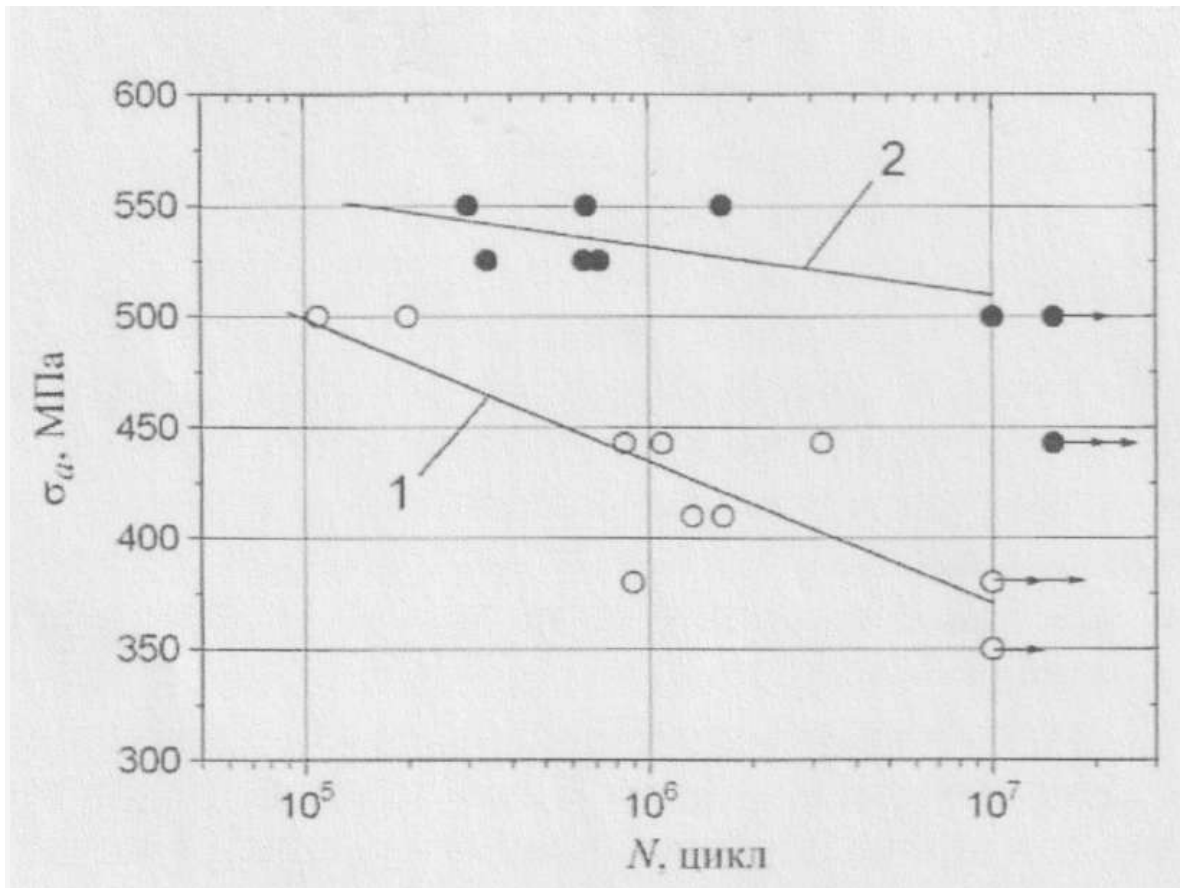


Рисунок 3.13 – Результати випробувань на втому зразків у вихідному стані (1) та після іонно-плазмового азотування (2).

Аналіз результатів показує, що всі зразки після технологічної обробки іонно-плазмового азотування вистояли або зруйнувалися при більш високих рівнях напружень, ніж зразки у вихідному стані. Межа витривалості на основі $N = 10^7$ циклів зразків у вихідному стані дорівнює $\sigma_{-1} = 380$ МПа, зразків після ПА $\sigma_{-1} = 500$ МПа, тобто на 32% вище. Таке збільшення характеристик опору втоми зразків забезпечує тонкий (глибина 8-9 мкм) поверхневий шар, який утворився в результаті ПТА. Сформований зміцнений шар сприяє уповільненню процесу розсіяного накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні зразка і гальмування поширення тріщин втоми. Аналогічні

результати були отримані при дослідженні впливу магніто-абразивної та хіміко-термічної обробки сплаву титану [22].

В зламі після втомного руйнування зазвичай спостерігається осередок тріщиноутворення, який розташовується на поверхні, зона розвитку втомної тріщини, яка має тонковолокнисту будову, та область кінцевого зламу, що має більш менш крупнозернистий вид, що мало відрізняється від поверхні крихкого зламу [16].

Відмінність цих зон в тому, що в зоні розвитку втомної тріщини руйнування протікає після відносно невеликої кількості циклів навантаження ($N < 2 \cdot 10^5$) і розвиток втомної тріщини супроводжується, внаслідок високого рівня діючих напружень, значними пластичними деформаціями, які можуть привести до помітних змін форми та розмірів. В зоні кінцевого зламу руйнування має місце після значного ($N > 2 \cdot 10^5$) числа циклів навантаження, суттєво менших меж текучості та пружності, та протікає без видимих слідів залишкової деформації. Тобто першу зону можна вважати зоною мало циклової втоми, а друга зона – багатоциклової втоми.

Фрактографічному дослідженню підлягали зразки сплаву ЧС-70 у вихідному стані та після іонно-плазмового азотування, які пройшли випробування на втомну міцність та були зруйновані при різних кількостях циклів навантажень.

Так вихідні зразки в середньому витримували 10^9 циклів навантаження, після іонно-плазмового азотування - 10^{12} циклів навантаження.

Як видно з рис. 3.6, для вихідного зразка характерна класична будова зламу.

Осередок тріщиноутворення розташований на поверхні. В зоні розвитку втомної тріщини спостерігаються витягнута волокниста структура зі слідами пластичного деформування. Для зони кінцевого руйнування характерна крупнозерниста структура з ділянками, що нагадують крихкий злам.

У випадку поверхневого зміцнення шляхом іонно-плазмового азотування характерно розташування осередку тріщиноутворення на деякій глибині під зміцненим шаром (рис.3.6).

Як відомо, будь-яке поверхнєве зміцнення сприяє виникненню стискаючих напружень в при поверхневих зонах. Відповідно, під зоною стискаючих напружень розташована зона розтягуючих напружень. Саме там скоріш за все і виникають осередки тріщиноутворення. Глибина залягання осередків визначено для зразків, зміцнених плазмовим азотуванням – майже 100 мкм.



Рисунок 3.6 - Злам зразка зі сплаву ЧС-70, зміцненому іонно-плазмовим азотуванням, після випробування на втомну міцність

Тріщини мають дугоподібну форму, кінці їх виходять як на поверхню, так і розповсюджуються в глибину, утворюючи зону розвитку втомної тріщини. За будовою зона розвитку втомної тріщини та зона кінцевого руйнування не відрізняються від відповідних зон вихідного зразка.

ВИСНОВКИ

- Показано вплив іонно-плазмового азотування на будову, перерозподіл хімічних елементів, що входять в склад сплаву та мікротвердість зміцненої зони.

- Після іонно-плазмового азотування зміцнений шар має товщину до 9 мкм, причому зона з підвищеним вмістом азоту - до 5,35 % мас., складає 3-3,5 мкм. Максимальна мікротвердість до 8,5 МПа відповідає при поверхневій зоні. Зміцнений шар, що сформувався при іонно-плазмовому азотуванні характеризується вмістом азоту до 5,34 % мас., в тонкому шарі товщиною 2-3 мкм. В цій же зоні високий вміст кисню – до 15,8 % мас. (рис.3.4). Виходячи з того, що зона підвищеної мікротвердості зберігається на відстані 8-9 мкм від поверхні, можна припустити зміцнюючий вплив плазмової обробки на її властивості.

- В тонкій при поверхневій зоні товщиною близько 1 мкм високий вміст кисню – до 15,5 % мас. Мікроструктурно оксидних фаз не визначено, тобто кисень утворює пересичений твердий розчин в нікелі.

- Особливістю хімічного складу зміцненого шару є підвищений майже в 2 рази вміст вольфраму та молібдену, а також залізо. В той же час вміст нікелю падає до 50 %мас., а кобальту до 4%мас. Скоріш за все це можна пояснити деяким випаровуванням в результаті нагрівання при плазмовій обробці та частковим відтисненням цих елементів від азотованого шару. Відомо, що нікель та кобальт, на відміну від вольфраму та молібдену, мають дуже малу спорідненість до азоту та кисню.

- Ніобій, титан, алюміній в зміцненому шарі містяться в тій же кількості, що й в серцевині.

- Проведені випробування на втому зразків у вихідному стані та після іонно-плазмового азотування. Завдяки сформованому зміцненому шару на поверхні зразків уповільнюється процес накопичення пошкоджень при

циклічному навантаженні та підвищуються характеристики опору втоми. Показано, що після технологічної обробки іонно-плазмового азотування зразків їхня межа витривалості на базі $N = 10^7$ цикл на 32% вища, ніж у вихідному стані.

- Фрактографічному дослідженню підлягали зразки сплаву ЧС-70 у вихідному стані та після іонно-плазмового азотування, які пройшли випробування на втомну міцність та були зруйновані при різних кількостях циклів навантажень.

- Для вихідного зразка характерна класична будова зламу. Осередок тріщиноутворення розташований на поверхні. В зоні розвитку втомної тріщини спостерігаються витягнута волокниста структура зі слідами пластичного деформування. Для зони кінцевого руйнування характерна крупнозерниста структура з ділянками, що нагадують крихкий злам.

- У випадку поверхневого зміцнення шляхом іонно-плазмового азотування характерно розташування осередку тріщиноутворення на деякій глибині майже 100 мкм.

- Тріщини мають дугоподібну форму, кінці їх виходять як на поверхню, так і розповсюджуються в глибину, утворюючи зону розвитку втомної тріщини. За будовою зона розвитку втомної тріщини та зона кінцевого руйнування не відрізняються від відповідних зон вихідного зразка.

4. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Науково-технічна ефективність НДР

Спосіб іонно-плазмового азотування один з самих ефективних і поширених технологічних методів поверхневого зміцнення, що підвищують опір зношування різноманітних деталей машин, що експлуатуються при відносно великих контактних навантаженнях, коли недоцільно використовувати інші види поверхневого зміцнення, наприклад, цементацію.

В порівнянні з іншими хіміко-термічними методами іонно-плазмового азотування має декілька переваг, які зробили його досить поширеним способом для покращення сталі та інших сплавів. Перш за все оброблений матеріал володіє вищим показником твердості без проведення термообробки ніж вихідний матеріал. Із-за технології іонно-плазмового азотування розміри на деталі не змінюються, що дозволяє проводити чистову (фінішну) обробку деталі зберігаючи розміри деталі в межах заданих їй допусків. Також спосіб іонно-плазмового азотування зберігає чистоту поверхні, зберігаючи її товарний вигляд та викидає необхідність додаткової мех.обробки (полірування, шліфування).

Результати іонно-плазмового азотування дають досить високі показання порівнюючи з іншими показниками, наприклад матеріал після цементування може зберігати стабільні показники твердості при температурі не більше 225°C, а матеріал оброблений іонно-плазмовим азотуванням здатен витримувати знакозмінні навантаження при температурах близько 1000 °C при досить тривалому робочому діапазонні. Причиною тому служить сам механізм плазмового азотування, внаслідок якого виникає поверхневий шар, який в 1,5-2 рази міцніше ніж після цементації.

4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

4.2.1 Витрати на оплату праці

Вартість праці експерименту (табл. 4.1) – це основна зарплатня учасників (без урахування бонусів та інших витрат на прибуток).

Таблиця 4.1 Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоден на зарплата	Усього за виконавцями
Професор кафедри	30	19438	916,89	59597,64
Провідний інженер	45	9718	458,39	9167,92
Інженер-дослідник	75	9238	435,75	34860,37
Разом оплата праці з теми				80816,04

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Basis для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі за формулою (4.1) (підсумок по табл.4.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22, \quad (4.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 80816,04 \cdot 0,22 = 17779,53 \text{ грн.} \quad (4.2)$$

4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

В даній статті враховують вартість усіх видів матеріалів, необхідних для проведення НДР, з вирахуванням вартості зворотних відходів. Розрахунки зводять за формулою (4.3), (4.4) та таблицею (4.2).

Таблиця 4.2 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн.	Сума, грн
Пруток жароміцного сплаву на основі нікелю ЧС-70	ГОСТ 1465-75	м	0,09	1300	117
Аміак в газоподібному стані	ГОСТ 6221-90	л	6	23,75	142,5

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10% від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_{\text{в}} = 259,5 \cdot 0,1 = 25,95 \text{ грн} \quad (4.3)$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю матеріалу та їх транспортування буде становити:

$$B_{\text{м}} = 259,5 + 25,95 = 285,45 \text{ грн} \quad (4.4)$$

4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

Всі роботи проводились безпосередньо на кафедрі металознавства та термічної обробки, тому витрати на енергоносії не передбачені.

4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

В роботі використовується вже існуюче обладнання: Піч для азотування; Металографічний оптичний мікроскоп НЕОРНОТ-21; Рентгенівський дифрактометр ЗМ; ПМТ-3 тестер твердості по Роквеллу. Все обладнання належить кафедрі металознавства та термічної обробки, тому витрати на оренду обладнання не передбачені.

4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій

Дана робота не потребувала оренди дослідницьких установок, адже всі вони були в наявності. Зразки виготовлялись безпосередньо в лабораторіях кафедри металознавства та термічної обробки, тому витрати на послуги сторонніх організацій не передбачені.

4.2.7 Витрати на службові відрядження

Всі роботи проводились безпосередньо в лабораторіях кафедри металознавства та термічної обробки, тому витрати на відрядження не передбачені.

4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

У цій статті поєднуються всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей. При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрати на виконання НДР. Підраховуємо за формулою (4.5).

$$I_B = (ЗП + ЄСВ + В_M) \cdot 0,1, \quad (4.5)$$

За формулою (4.6) I_B буде становити:

$$I_B = (80816,04 + 17779,53 + 285,45) \cdot 0,1 = 9888,1 \quad \text{грн} \quad (4.6)$$

4.2.9 Накладні витрати

Ця стаття включає витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на амортизацію основних засобів; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і техніки безпеки; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов'язкові платежі і витрати тощо.

Розглянемо варіант розрахунку накладних витрат пропорційно сумі прямих витрат на рівні 20 % за формулою (4.7).

$$H_B = (ЗП + ЄСВ + В_M + I_B) \cdot 0,2, \quad (4.7)$$

За формулою (4.8) H_B буде становити:

$$H_B = (80816,04 + 17779,53 + 285,45 + 9888,1) \cdot 0,2 = 21753,8 \quad \text{грн.} \quad (4.8)$$

4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Усі витрати, понесені на виконання роботи (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1. Витрати на оплату праці	80816,04	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	17779,53	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3. Матеріали для проведення досліджень	285,45	Відповідно до розрахунків
4. Енергоносії для проведення досліджень	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5. Спецобладнання для наукових цілей	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6. Вартість послуг сторонніх організацій	–	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7. Витрати на службові відрядження	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8. Інші невраховані прямі витрати по темі	9888,1	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9. Накладні витрати	21753,8	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту НДР необхідно для визначення доцільності проведення даної роботи. Проте він може бути розрахований лише по НДР, які безпосередньо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Для визначення річного економічного ефекту скористаємося бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;

в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.

г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;

д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.4 становить:

$$B = 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7 = 525$$

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1.Важливість розробки	K_1	Результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результати розробки можуть бути використані декількома організаціями	5
3.Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів	5
4.Складність дослідження	K_4	Робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень	7

Умовний ефект НДР розраховується за формулою (4.9):

$$E_{НДР}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot B_{НДР} , \quad (4.9)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$B_{НДР}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 4.3);

У наших підрахунках (4.10) умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{НДР} = 500 \cdot 525 - 0,2 \cdot 130522,92 = 236395,5 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою (4.11):

$$E_e = \frac{E_{НДР}}{B_{НДР}}. \quad (4.11)$$

У нашому прикладі за формулою (4.12) E_e буде становити:

$$E_e = \frac{236395,5}{130522,92} = 1,81 \quad (4.12)$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,81 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

ОХОРОННА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

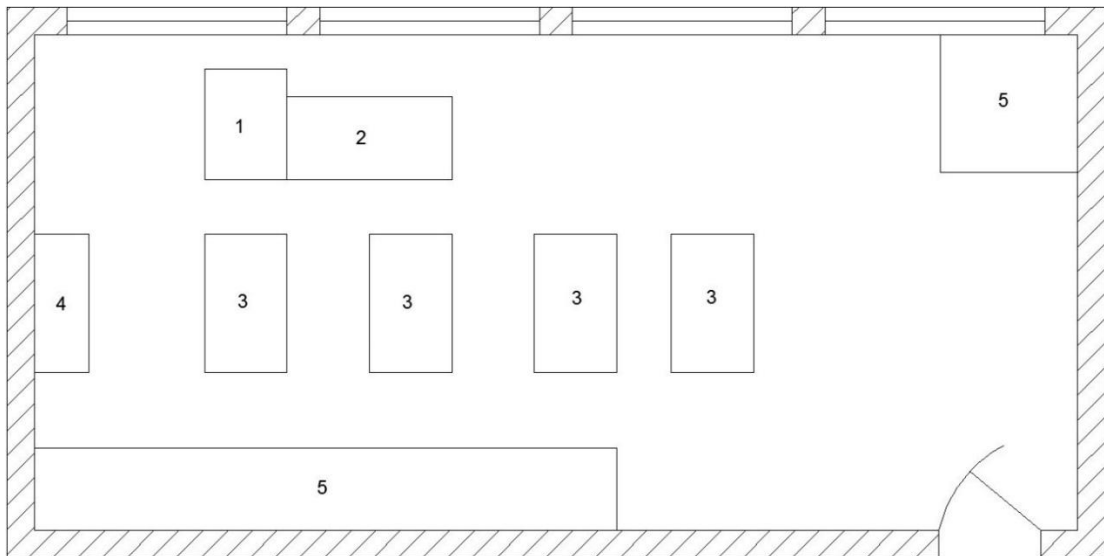
Невід'ємною частиною організації праці і виробництва є охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Ст. 1 Закону України "Про охорону праці" [23].

Крім того, охорона праці включає організаційні і технічні заходи, спрямовані на усунення причин травматизму і захворювань робітників та службовців на виробництві, створення для них безпечних умов, поступову ліквідацію шуму і вібрацій, запиленості виробничих приміщень, будівництво і реконструкцію санітарно-побутових приміщень, поліпшення забезпечення робітників засобами індивідуального захисту. Усе це в комплексі підвищує продуктивність праці людини і зберігає її здоров'я та удосконалює технологічні схеми виготовлення того чи іншого продукту.

Метою даного розділу є аналіз небезпечних та шкідливих чинників в процесі отримання азотного покриття на сплаві ЧС–70 після іонно-плазмового азотування.

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

Дослідження покриття на сплаві ЧС – 70 проводилось в 305 лабораторії (9 корпус) Інженерно-фізичного факультету НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського". Схематичне зображення лабораторії представлено на рисунку 5.1.



1 – робоче місце з ПК; 2 – робоче місце з машиною тертя МТ-68;
3 – робочий стіл; 4 – витяжна шафа; 5 – термічні установки.

Рисунок 5.1 - Схематичне зображення лабораторії 305 (9 корпус) ІФФ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського.»:

У лабораторних умовах створювалось іонно-плазмове азотування поверхні,

Зразки, які були отримані після іонно-плазмового азотування, обробляли на шліфувальній установці. Мікроструктурні дослідження виконувались на мікроскопі НЕОРНОТ-21 в інтервалі збільшень (50-1000) разів.

Для виявлення мікроструктури застосували реактиви «Марбля» та «царську горілку». Час травлення 3 с – 5 с.

Розміри лабораторії – ширина (6м), довжина (8,3м), висота (3,2м)

Площа лабораторії складає: $S = a \cdot b = 6 \cdot 8,3 = 49,8 \text{ м}^2$

Об'єм лабораторії складає: $V = a \cdot b \cdot c = 6 \cdot 8,3 \cdot 3,2 = 159 \text{ м}^3$

Кількість працюючих становить три особи.

Таким чином, на одного працюючого припадає $16,6 \text{ м}^2$ площі і 53 м^3 об'єму, що задовольняє вимогам санітарних норм і правил ДСанПіН 3.3.2.007-98 для приміщень з ПЕОМ норма площі на одну особу становить $6,0 \text{ м}^2$, а норма об'єму приміщення на одну особу – 20 м^3 [24].

5.2 Аналіз мікроклімату в робочій зоні приміщення

Мікроклімат внутрішнього середовища лабораторії визначається періодом року, поєднанням температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, температури оточуючих людину поверхонь та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення. Роботи за важкістю відносяться до категорії Іб (легкі фізичні роботи, що виконуються сидячи, стоячи або зв'язані з ходьбою і не потребують важких систематичних фізичних навантажень, затрачується 150 Ккал/год.).

Результати дослідження параметрів мікроклімату в лабораторії 305 наведені в таблиці 5.1

У приміщенні використовується водяне опалення і механічна загальнообмінна вентиляція.

На основі наведених даних можна зробити висновок, що мікроклімат в лабораторії відповідає вимогам санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99 [\[25\]](#).

Таблиця 5.1 – Величини параметрів мікроклімату в лабораторії 305

Категорія робіт	Параметр мікроклімату	Період року	Нормовані значення		Дані вимірювань	Висновок
			Оптимальне	Допустиме		
Середньої важкості Па	Температура, °С	Теплий	21-23	18-27	22	Оптимально
		Холодний	18-20	17-23	19	допустимо
	Відносна вологість повітря, %	Теплий	60-40	65	51	Оптимально
		Холодний	60-40	75	47	Оптимально
	Швидкість руху повітря, м/с	Теплий	0,2	0,2-0,4	0,16	Допустимо
		Холодний	0,2	Не більше 0,3	0,09	Допустимо

5.3 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення буває трьох видів: природне, штучне і суміщене. Природне у свою чергу поділяється на бічне, верхнє та комбіноване. Штучне – загальне і місцеве [26]. Характеристика зорової роботи поділяється за класами точності:

- найвищої точності,
- дуже високої,
- високої,
- середньої,
- малої,
- дуже малої точності.

Наша робота підходить під клас середньої точності.

В лабораторії 305 використовується система сумісного освітлення – освітлення, при якому в світлий час доби використовується природне та штучне освітлення. При цьому, недостатнє, за умовами зорової роботи, природне освітлення доповнюється. Природне освітлення в лабораторії – бокове, тобто здійснюється через бокові світлові прорізи в наружних стінах з західної сторони.

В світлий час доби використовується, в основному, природне освітлення. Воно забезпечує добру освітленість та сприятливо впливає на зір. Природне освітлення повністю задовольняє встановленим нормам, що дозволяє в денний час економити електроенергію. Світильники штучного освітлення розміщені у верхній зоні приміщення рівномірно.

Недостатність і надмірність освітлення призводить до погіршення зору, що потенційно може призвести до професійного захворювання. Довготривале перебування в умовах поганої освітленості викликає близорукість. Нерівномірність освітлення приводить до частої переадаптації очей під час роботи і, як наслідок, до швидкого втомлення органів зору.

5.4 Аналіз впливу шуму та вібрації

Головним шумовим агрегатом є робота витяжної вентиляції марки С4.70-3.2., яка знаходиться над печами та шліфувальної установки.

Характер шуму тональний. Тривалість роботи вентиляції залежить від тривалості роботи печі (2 години на зміну).

Тривалість роботи шліфувальної установки 2/1 НОМ становить 30 хв.

Фактичний шум складає 65 дБА. Нормування тонального шуму здійснюється відповідно з ДСТУ 2325-93 [27]. Нормування тонального шуму здійснюється відповідно з ДСТУ 2325-93 [27]. Згідно цих норм загальний рівень шуму в приміщенні лабораторії не повинен перевищувати 75 дБА. Оскільки шум в лабораторії не перевищує встановлені норми, то шкідливого впливу на людину не відбувається.

При роботі на шліфувальних та полірувальних кругах утворюється шум, який сприяє швидкій втомі робітника, і, як внаслідок, зниженню продуктивності праці, розладу нервової системи. Для запобігання шкідливого впливу шуму на людину шліфувальні та полірувальні круги встановлені в окремому приміщенні та ізольовані спеціальними звукопоглинальними матеріалами.

Джерелом вібрації є витяжна вентиляція та шліфувальна установка.

Фактичний рівень вібрації становить по віброприскоренню 25 дБА та віброшвидкості 54 дБА.

5.5 Аналіз забрудненості повітря

Вплив пилу на організм людини залежить від складу пилу та його походження. Нетоксичний пил може викликати подразнення шкіри, при цьому

може виникнути захворювання шкіри – дерматит. Якщо пил проникає в легені, то він може викликати таке професійне захворювання, як пневмоконіоз.

Чистота повітря в лабораторії визначається вмістом пилу і шкідливих речовин. В повітрі робочої зони періодично контролюється вміст шкідливих речовин в повітрі лабораторії.

Для захисту органів дихання від попадання в них пилу в даній роботі слід використовувати протипилові респіратори [28]. Для локалізації шкідливих речовин також встановлена механічна витяжна вентиляція марки С4.70-3.2.

5.6 Електробезпека

Живлення всього обладнання в лабораторії здійснюється від мережі з напругою 380В. Обладнання, що використовується, відноситься до I та II класів електротехнічних виробів за способом захисту людини від враження електричним струмом у відповідності з ДСТУ 7237:2011.

Вимоги до будови електроустановок наведені у Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ-2017), які розповсюджуються на електроустановки, що споруджуються чи реконструюються, напругою до 500 кВ. Відповідно до ПНЕ, приміщення за небезпекою електротравм поділяються на три категорії згідно з наявністю в приміщенні чинників підвищеної або особливої небезпеки електротравм. У випадку, що досліджується, в приміщенні відсутні чинники підвищеної і особливої небезпеки, тому воно відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки електротравм.

У процесі роботи з електрообладнанням може виникнути небезпека враження електричним струмом. Основними причинами є пошкодження ізоляції та, як наслідок, доступність до струмоведучих частин обладнання; появи напруги на відключених струмоведучих частинах внаслідок помилкового включення установки; невиконання або неправильне виконання вимог техніки електробезпеки, неуважність при роботі.

Для забезпечення електробезпеки працюючих використовують наступні заходи: періодичну перевірку стану ізоляції, недоступність струмоведучих частин, забезпечення своєчасного навчання і перевірка знань працівників з питань електробезпеки.

5.7 Вентиляція приміщення лабораторії

Примусова вентиляція, вона ж вентиляція з механічним спонуканням передбачає у своїй системі наявність певних пристроїв для транспортування повітряного потоку. Ці пристрої називаються вентилятори, підбір яких і є кінцевою метою, яку передбачає розрахунок примусової вентиляції, тобто розрахунок вентиляції з механічним спонуканням [29].

Температура в приміщенні повинна становити 23°C, відносна вологість повітря 60%.

Обсяг повітрообміну (витяжна вентиляція), необхідний для видалення надлишкового тепла з приміщення, розраховується за формулою:

$$L_Q = \frac{Q_{\text{надл}}}{C_p r (t_{\text{вид.}} - t_{\text{прит.}})},$$

де $Q_{\text{надл}}$ – надлишкове тепло, кДж/год.

C_p – теплоємність сухого повітря, $C_p = 1,1$ кДж/год; r – щільність повітря, що надходить, $r = 1,193$ км/м³ при 273К;

$t_{\text{вид.}}$ – температура повітря, що видаляється з приміщення, °С;

$t_{\text{прит.}}$ = температура приточного повітря.

Температура повітря, що видаляється з приміщення визначається з виразу:

$$t_{\text{вид.}} = t_{\text{р.з}} + \Delta t (H - 2),$$

де $t_{\text{р.з}}$ – температура повітря в робочій зоні, $t_{\text{р.з}} = 22$;

Δt – температурний градієнт по висоті приміщення, $\Delta t = 0,5$ °С/м;

H – відстань від полу приміщення до центру витяжного зонта, $H = 2,5$ м;

Таким чином, температура повітря, що видаляється з приміщення складає:

$$t_{\text{вид.}} = 27 + 0,5 * (2,5 - 2) = 27,25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Надлишкове тепло розраховується за формулою:

$$Q_{\text{надл}} = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

де Q_1 - тепловиділення від штучного освітлення, кДж/год;

Q_2 – тепловиділення людей, кДж/год;

Q_3 – надходження тепла через світлові прорізи, кДж/год.

Тепловиділення від штучного освітлення розраховується за формулою:

$$Q_1 = 3600 * N_{\text{осв}} * n,$$

де $N_{\text{осв}}$ – сумарна потужність джерел освітлення, кВт;

n – коефіцієнт теплових втрат, $n = 0,2$ для люмінесцентних ламп.

У приміщенні наявно 4 світильники з двома лампами ЛД30 (30 Вт) і 4 місцевих світильника з люмінесцентними лампами потужністю по 7 Вт.

Тоді за формулою отримуємо:

$$Q_1 = (4 * 0,03 + 4 * 0,007) * 0,2 * 3600 = 106,56 \text{ кДж/год.}$$

Тепловиділення людей розраховується як:

$$Q_2 = 3600 * q_i * n,$$

де q_i – тепло, яке виділяється людьми (чоловіками), в залежності від витрат енергії і температури в приміщенні, кВт;

n – кількість людей, які одночасно знаходяться в приміщенні.

Для розумової праці явні тепловиділення одної людини складають близько 55 Вт при 20°C.

Розрахуємо Q_2 за формулою:

$$Q_2 = (0,055 * 3) * 3600 = 594 \text{ кДж/год.}$$

Розрахуємо надходження тепла через світлові прорізи:

$$Q_3 = 3600 * F_{\text{ст}} * q_{\text{ст}} * A_{\text{ст}},$$

де $F_{\text{ст}}$ – площа поверхні засклення, м²;

$q_{ст}$ – виділення тепла від сонячної радіації, кВт/м²; через 1 м² поверхні стекла (з урахуванням орієнтації за стороною світла), $q_{ст} = 90$ Вт/м²;

$A_{ст}$ – коефіцієнт врахування характеру застосування, $A_{ст} = 0,6$.

У приміщенні наявні 2 вікна розміром 2*1,8 м. Тоді маємо:

$$F_{ст} = 2 * 2 * 1,8 = 7,2 \text{ м}^2.$$

З урахуванням усіх величин теплопостачання тепла через світлові отвори складають:

$$Q_3 = 3600 * 7,2 * 0,6 * 0,09 = 1399,68 \text{ кДж/год.}$$

Таким чином, надлишкове тепло в приміщенні складає:

$$Q_{надл} = 106,56 + 594 + 1399,68 = 2100,24 \text{ кДж/год.}$$

Повітрообмін необхідний для видалення надлишкового тепла за формулою, маємо:

$$Lq = \frac{2100,24}{1,1 * 1,193 * (27,25 - 23)} = 376,57 \text{ м}^3/\text{год}$$

Отже, для видалення надлишку тепла в лабораторії потрібно встановлення витяжної вентиляції продуктивністю 376,57 м³/год.

Встановлена витяжна вентиляція марки С5.455-3.0, складається з витяжного отвору, через який повітря видаляється з приміщення.

Витяжка зображена на рис. 5.2



Рисунок 5.2 – Витяжна вентиляція марки С5.45-3.0

При роботі витяжної системи чисте повітря потрапляє в приміщення через нещільності в огорожуючих конструкціях. Ця обставина є суттєвим недоліком, так як неорганізований приток холодного повітря (протяги) можуть викликати простудні захворювання.

Отже, в холодний період року необхідна додаткова подача тепла.

Конструкція витяжної вентиляції зображена на рис. 5.3.

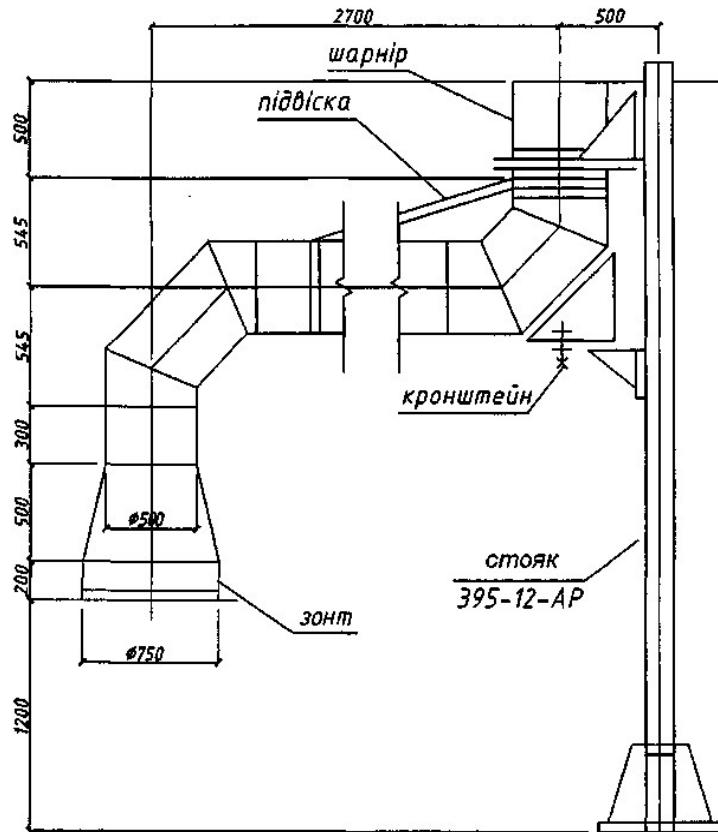


Рисунок 5.3 – Конструкція витяжної вентиляції марки С5.45-3.0,

5.8 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [32] лабораторія має ознаки категорії В, оскільки присутні горючі елементи (столи, шафи, паркет); горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали (в тому числі пил та волокна), речовини та матеріали, здатні при взаємодії з водою, киснем, повітрям або одне з одним горіти, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться (використовуються), не належать до категорій А та Б.

Отже, приймаємо категорію В.

Первинні засоби пожежогасіння призначені для ліквідації невеликих осередків пожеж, а також для гасіння пожеж у початковій стадії їхнього розвитку силами персоналу об'єкта до прибуття штатних підрозділів пожежної охорони.

До первинних засобів пожежогасіння відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар (бочки з водою, пожежні відра, ящики з піском, совкові лопати, протипожежні покривала) та пожежний інструмент (гаки, ломы, сокири тощо). Вогнегасники та пожежний інвентар повинні мати червоне пофарбування.

У приміщенні лабораторії в наявності є вогнегасник ВВК-2. Також недалеко (15 м) від лабораторії знаходиться пожежний гідрант з рукавом.

Своєчасне виявлення ознак займання і виклик пожежних підрозділів дає можливість швидко локалізувати осередки пожежі та провести заходи щодо її ліквідації, а відтак дозволить суттєво зменшити обсяги заподіяної шкоди.

Найбільш швидким та надійним засобом сповіщення про виникнення пожежі вважаються установки електричної пожежної сигналізації (ЕПС).

Одним із основних елементів установок ЕПС є пожежні сповіщувачі. Розрізняють сповіщувачі ручної та автоматичної дії.

В приміщенні лабораторії встановлені теплові пожежні сповіщувачі типу ДТЛ, кількість яких становить 4 одиниці. Розміщення їх відповідає нормам за схемою квадратного розміщення сповіщувачів.

В даній лабораторії мають місце такі профілактичні заходи:

- 1) Інформаційний лист ознайомлення зі змістом пожежної безпеки зазначеним у ньому прізвищем відповідального.
- 2) План евакуації з приміщення лабораторії (рис. 5.4).
- 3) Проведення профілактичних робіт вогнегасника.
- 4) Перевірка теплових сповіщувачів.
- 5) Встановлення захисного покриття біля високопродуктивного дифузійного насосу та періодичне перевірення їх.
- 6) Проведення інструктажу перед початком роботи.

У випадку згорання приладів для дослідження необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен інженер чи лаборант, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- 1) негайно сповістити про це пожежну охорону за телефоном 101 університету;
- 2) приступити до гасіння вогню пожежі наявними в лабораторії засобами пожежогасіння (вогнегасник, пожежний кран тощо);
- 3) викликати до місця пожежі посадових осіб (головного інженера, начальника охорони, декана).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це головного інженера, декана та звернутися в медпункт [\[30\]](#).

План евакуації зображений на рис. 5.4

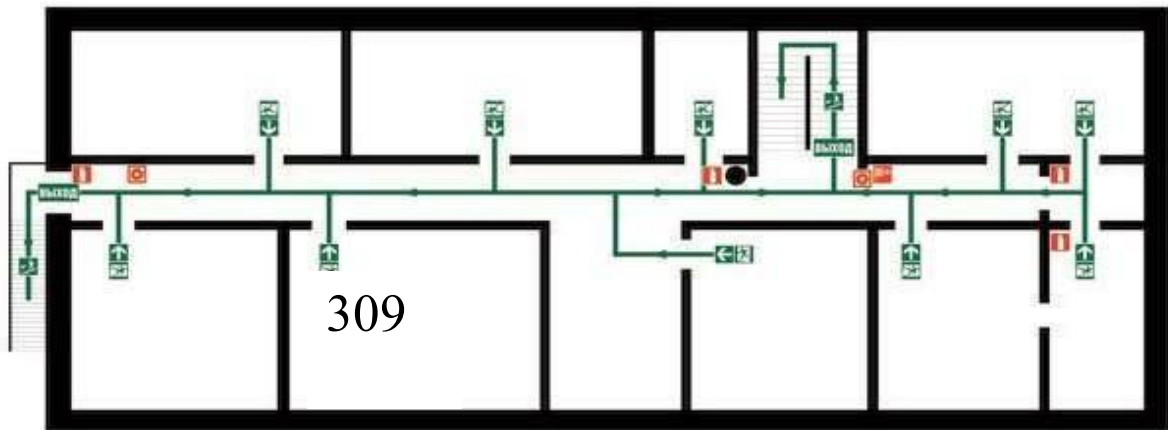


Рисунок 5.4 – План евакуації з приміщення лабораторії [\[31\]](#)

5.9 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

У випадку пробою електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це лаборантів, які відповідають за конкретну лабораторію, або старшого по експерименту.

У разі потрапляння кого – небудь під напруг, необхідно відключити електродуговий агрегат 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 електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник та учасник дослідження , що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран, тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника лабораторії, тощо);

У разі одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, лаборанта та звернутися в медпункт.

ВИСНОВОК

- Показано вплив іонно-плазмового азотування на будову, перерозподіл хімічних елементів, що входять в склад сплаву та мікротвердість зміцненої зони. Зміцнений шар має товщину до 9 мкм, вміст азоту - до 5,35 % . Максимальна мікротвердість до 8,5 МПа відповідає при поверхневій зоні. В цій же зоні високий вміст кисню – до 15,8 % мас. Визначено також зміцнюючий вплив плазмової обробки на її властивості.
- В поверхневій зоні зменшується вміст нікелю падає до 50 %мас., а кобальту до 4%мас., та підвищується майже в 2 рази вміст вольфраму - до 8,87 % мас., та молібдену – до 3,22% мас., а також залізо до 10,2 % мас.
- Після ПА в поверхневому шарі формуються включення нітриду хрому CrN зі зменшеним параметром ґратки $a=0,4143$ нм внаслідок зменшення вмісту азоту та легування залізом. Внаслідок перерозподілу елементів зменшується параметр γ -твердого розчину до $a=0,3585$
- Показано, що після технологічної обробки іонно-плазмового азотування зразків їхня межа витривалості на базі $N = 10^7$ цикл на 32% вища, ніж у вихідному стані. Осередок тріщиноутворення розташовується на глибині 100 мкм.
- Поверхнєве зміцнення іонно-плазмовим азотуванням може бути рекомендовано для підвищення поверхневої твердості та втомної міцності жаростійких нікелевих сплавів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singer R.F., Advabnced/ Materials and Processes for Land – based Gas Turbines Materials for Advanced Power Engineering 1994.
2. Петрушын Н.В. Светлов И.Л. Физико – химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов . Метал. 2001. 63 – 73 с.
3. Е.В. Монастырская, Морозова Г.И, Власов Ю. Б. Структура., Фазовый состав и свойства коррозионостойкого жаропрочного сплава ЧС 88у., ВИАМ. 2006 – 204528.
4. С. Б. Масленков., Жаропрочные стали и сплавы.. Справочник., «Металлургия»., Москва, 1998.
5. Трощенко В.П., Матвеев В.В., Грязнов Б.А., Несущая способность топочих лопаток ГТО при вибрационных напряжениях – Киев. Наук. Думка, 1981 – 314с.
6. Термопрочность деталей машин, И.А. Биргер , Б.Ф. Морр, И.В.Демянушко, Машыностроение 1975 – 455 с.
7. Кузнецов Н.Д. , Цейплинг В.И. Эквивалентные испытание газотурбинных двигателей . Машыностроение 1976 – 212 с
8. Исследование долговечности рабочих лопаток турбин в условиях нестационарных трехкомпонентних нагрузок. А. П. Позецкий, В.Ф. Лапилов, Е.Н. Карповы и др.
9. Несущая способность лопаток газових турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействиях. Г.Н.Третьяченко, Л.В.Кравчук, Р.И. Курлаги, и др. – Киев; Наук. Думка. 175 – 294 с.
10. ГОСТ 100304 – 79 Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждений лопаток. Компресоров двигателей от попадания посторонних предметов. – Введ 01.07.79
11. Ю.С. Нашимов, Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей. Институт проблем прочности им Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев.

12. <https://develop.kradi.kharkov.ua>
13. Г. І. Лашенко., Плазменное упрочнение и напыление; Киев-Екотехнология; 2003р. 8-10 с.
14. Гречнева М.В. Гокмаков В.П. Плазменное упрочнение металлов в жидких средах // Сварочное производство. – 1992. - № 7. 8-9 с.
15. Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковський, В. І. Мірненко, О. В. Радько, Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді, Пат. 10014 Україна, МПК (2006) С23С 8/06, Чинний від 15.12.06, Бюл. № 12.
16. Р. Чаттерши-Фишер, Ф.-В. Ейзел, Азотирование и карбонитрирование, Металлургия, Москва (1990).
17. R. Gran, W/ Exner. und R. Zeller, «Puls-Plasma – Wormebehandlung zum Oberflochen und Randschicht behandeln», Harter. Techn. Mitt., 42, No.1, 42-46, 47-49 (1987)/
18. ГОСТ 25.502 – 79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний на усталость, Введен 01.01.81.
19. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия. В. Т. Трощенко., Г. В. Цыбанев., Б. Р. Грязнов., Ю. С. Налимов. – К.: ИПП НАН Украины 2009. 664 с
20. В. Т. Трощенко (ред.), Прочность материалов и конструкций, Т. 2: В. Т. Трощенко, Г. В. Цыбанев, Б. А. Грязнов, Ю. С. Налимов, Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия, Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев (2009).
21. Д. Закс, Статистическое оценивание, Статистика, Москва (1976).
22. В. С. Майборода, Ю. С. Налимов, А. Н. Соловар и др, « Влияние комплексной магнито-абразивной и химико-термической обработки на сопротивление усталости сплава ВТ9», Пробл. прочности, № 5, 138 – 147 (2016).
23. Ст 1. Закон про охорону здоров'я.

24. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2010. – 240 с.
25. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
26. ДБН В.2.5.-28-2006. Природне і штучне освітлення.
27. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
28. Средства защиты сварщиков: Каталог / О. Г. Левченко., В. Д. Воробьев, Ю. И. Шульга, А. О. Левченко, А. О. Лукьяненко, // Под ред. О. Г. Левченко. – К.: Экотехнология, 2012. – 136 с.
29. Местные вытяжные устройства к оборудованию для сварки и резки металлов: Методические указания по проектированию. – Л.: ВНИИОТ. – 1980. – 52 с.
30. ДСТУ 3273-95. Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.
31. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій та аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.
32. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

ДОДАТОК А

УДК 621.785.539

ВТОМНА МІЦНІСТЬ ОКСИДОВАНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT6**М.М. Бобина, М.В.Майборода, А.О.Шумова, О.М.Соловар, О.В.Орищук***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського», Інженерно-фізичний факультет,
кафедра металознавства і термічної обробки, м. Київ, Україна*

Показано влияние комплексного упрочнения поверхности титанового сплава VT6, состоящего из магнитно-абразивной обработки и оксидирования на поверхностную твердость и усталостную прочность.

The effect of complex hardening of the surface of VT6 titanium alloy, consisting of magnetic abrasive treatment and oxidation on surface hardness and fatigue strength, is shown.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день однією з найактуальніших проблем авіа- та моторобудування є проблема підвищення рівня та стабільності механічних властивостей конструкційних титанових сплавів. Особливо важливим стає питання збереження високої пластичності, втомної міцності та ударної в'язкості з одночасним підвищенням міцності, зносостійкості та стійкості проти термічної втоми поверхні. Так, наприклад, лопатки компресорів та турбін піддаються впливу статичних, динамічних та циклічних навантажень при одночасній дії підвищених температур [1]. Крім того, лопатки вертолітного двигуна піддаються інтенсивному ерозійному зношуванню в наслідок зіткнення з піщинками та іншими неметалевими частками. Відомо, що тверді та крихкі покриття на поверхні виробів, що працюють в умовах циклічних навантажень суттєво знижують їх ударну в'язкість та втомну міцність, а це неприпустимо для таких виробів, як лопатки газотурбінних двигунів та інших деталей в літако- та вертолітобудуванні. Як відомо, опір втоми конструкційних титанових матеріалів є критично важливою властивістю для застосування їх в авіації та двигунобудуванні. Деталі й конструкції, такі як лопатки і диски, витримують складні навантаження, наприклад високу амплітуду напруги і низьку частоту, а також високочастотні вібраційні навантаження зазвичай при достатньо точно високих напружених. Титановий сплав VT6 (Ti-6Al-4V) широко застосовується для виготовлення лопаток і дисків газотурбінних двигунів (ГТД), тому підвищення його втомних властивостей в сучасних ГТД є актуальним завданням.

Зараз в машинобудуванні для збільшення ресурсу роботи деталей з поверхнею тертя використовується хіміко-термічна обробка. Все ширше розповсюдження отримує економічне термічне оксидування. Процес дозволяє отримати різні поєднання вищевказаних властивостей в поєднанні з підвищеною корозійною стійкістю. У принципі можна отримати підвищені твердість поверхні, зносостійкість і опір втомі, а також поліпшити зовнішній вигляд поверхні виробів.

Мета роботи

Виходячи з цих вимог, було розроблено простий з технологічної точки зору, екологічно безпечний спосіб оксидування, при якому на поверхні сплаву формується твердий розчин кисню в титані

Метою даної роботи було визначити вплив оксидування на втомну міцність сплаву VT6.

Методика досліджень

Для вирішення задач, поставлених у даній роботі, в якості об'єктів дослідження використовували зразки з титанового сплаву марки VT6 з круглим поперечним перерізом типу I згідно ГОСТ 25.502-79 що при консольному закріпленні на вібростенді дозволяє локалізується місце руйнування

Зразки піддавали поверхневій обробці, яка складалася з попередньої магнітно-абразивної обробки (МАО), низькотемпературного оксидування та фінішної МАО

Поверхнєве зміцнення [2,3] титанових сплавів за рахунок поєднання хіміко-термічної та магнітно-абразивної обробок на даний час є актуальним і перспективним, оскільки кожен з цих методів обробки окремо дає позитивний вплив на поверхнєві властивості самих різних матеріалів..

Попередню активацію проводили магнітно-абразивним порошком, що складався з суміші ПОЛІМАМ-Т та сферичного порошку ПР Р6М5.

Режим попередньої магнітно-абразивної обробки був визначений у відповідності до робіт [3,4]: Обробка по заданому режиму МАО забезпечила шорсткість поверхні $Ra=0,13-0,17$ мкм .

Оксидування зразків з титанового сплаву ВТ6 проводили в замкненому реакційному просторі в повітряній атмосфері при температурі 550°C впродовж 2 годин за умови зниженого тиску. Оксидування погіршило чистоту поверхні.

Фінішна магнітно-абразивна обробка проводилася за білиш «м'яким» режимом. Кінцева шорсткість поверхні $Ra<0,25$ мкм

Після комбінованої обробки МАО+оксидування+МАО на поверхні сплаву ВТ6 дифузійний шар (рис.1), що складається з трьох зон на поверхні зафіксований шар Ti_2O_3 , товщина якого не перевищує 1 мкм., під ним утворився твердий розчин кисню в α -Ті товщиною до 20 мкм та мікротвердістю 6,5-5,5 ГПа, нижче розташований твердий розчин кисню в α - + β -Ті товщиною до 80 мкм, мікротвердість цієї зони змінювалася від 5,5 ГПа до мікротвердості основи (рис.2).

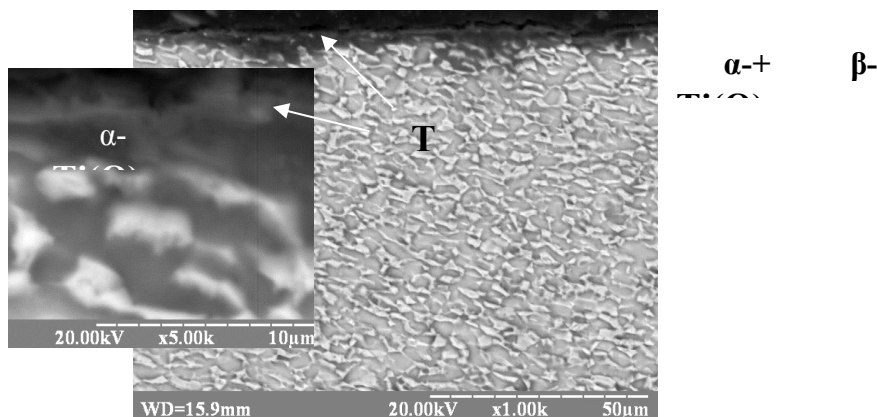


Рис. 1 Мікроструктура сплаву ВТ6 після комплексної поверхневої обробки.

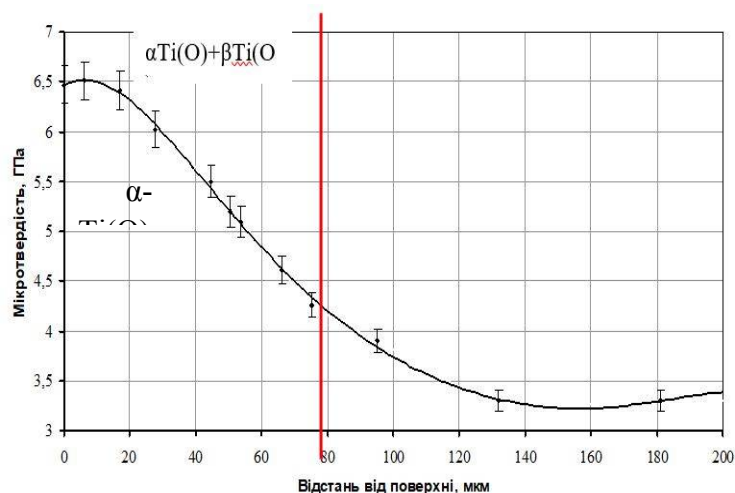


Рис.2. Розподіл мікротвердості за товщиною дифузійного шару на сплаві ВТ6 після МАО+оксидування+МАО

Те, що зразки з ВТ6 мали саме структуру твердого розчину дозволило їм витримувати багатоциклічні навантаження при дослідженні на втомну міцність.

Результати досліджен

Результати випробовування на втому приведені на рис. 3. Всі зразки, як вихідні, так і ті що пройшли обробку витримали базові 10^7 циклів при навантаженні 700 МПа без руйнування. В процесі випробувань довантаження робили поступово. Руйнування зразків, що були оброблені за запропонованим способом спостерігається тільки при навантаженні 1200 МПа, в той час, як зразки з вихідною структурою зруйнувались вже при 850 МПа. Сформований зміцнений шар в результаті обробки приводить до гальмування розповсюдження тріщин, що має підтвердження появою дугоподібної тріщини, утворилася вздовж поверхні (рис.4).

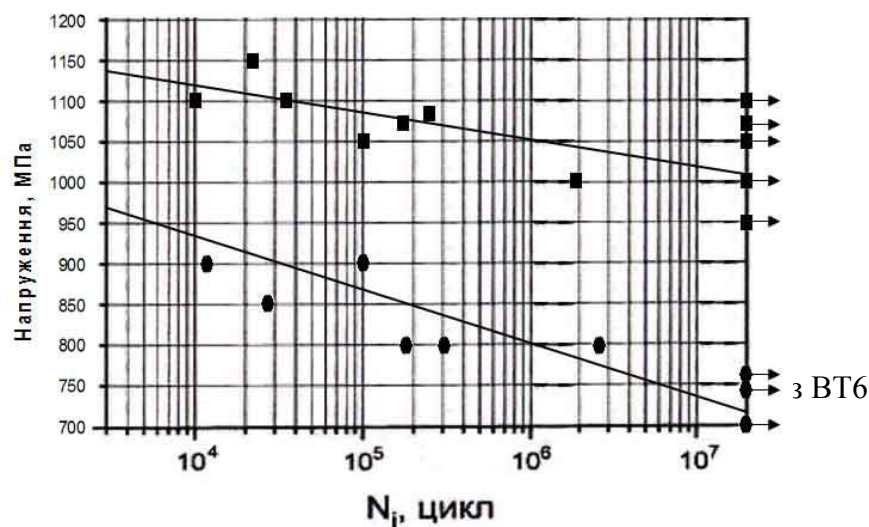
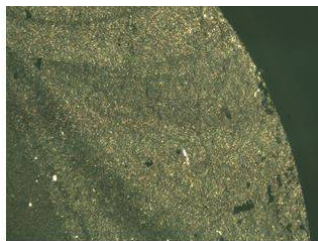


Рис. 4 Поверхня зламів навантаженні 1000 МПа зміцнюючий обробці



після 10^8 циклів при зразка ВТ6 підданого

Таким чином можна говорити про доцільність використання запропонованої зміцнюючої обробки для підвищення втомної міцності виробів з титанових сплавів.

Література

1. Технология производства титановых самолетных конструкций / [А.Г.Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков и др.] – М.: Машиностроение, 1995. – 448с.
2. Вязовская Л.М., Крамаровский Б.И., Майборода В.С. и др. Применение магнитно-абразивного метода для обработки лопаток // Авиаци. про-сть. – 1990. -№9. – С. 20 – 22.
3. Майборода В.С., Слободянюк І.В., Джулій Д.Ю. Магнитно-абразивна обробка деталей складної форми. ПП «Рута», 2017. –272 с.
4. М. М. Бобіна, В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко. Магніто-абразивна обробка багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин. // Металознавство та обробка металів, №3. – 2002. – с.72 – 75.

ДОДАТОК Б

УДК 621.785

ОКСИДУВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT6*К.т.н., доц Бобіна М.М., ас. Соловар О.М., студ. Бугай А.А., студ. Орищук О.В.**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут**ім. Ігоря Сікорського», Інженерно-фізичний факультет,**кафедра металознавства і термічної обробки, м. Київ, Україна**E-mail: anna_bugay1996@ukr.net*

Показана возможность насыщения поверхности титанового сплава VT6 кислородом без формирования значительных слоев оксидов с целью повышения усталостной прочности и других рабочих характеристик.

The possibility of saturating the surface of VT6 titanium alloy with oxygen without the formation of significant oxide layers in order to increase fatigue strength and other performance characteristics is shown.

Постановка проблеми

Титан та сплави на його основі переважно застосовуються, знайшли в авіації, ракетобудуванні, машинобудуванні, хімічній та харчовій промисловості, а також медицині, завдяки своїй високій питомій міцності, корозійній стійкості та біологічній інертності. Проте характерною особливістю титану є схильність до налипання, до поверхневого схоплювання з іншими металами, що обумовлює низьку його зносостійкість і обмежує використання у вузлах тертя механізмів і машин. Без додаткової зміцнюючої обробки використання титанових сплавів у вузлах тертя та місцях прямої контактної взаємодії практично неможливе [1].

Так як термічна обробка не забезпечує ефективного поверхневого зміцнення, тому вирішення цієї проблеми шляхом нанесення надійних зносостійких покриттів нашоветься на суттєві труднощі через велику хімічну спорідненість титану до кисню. Наявність оксидної плівки з низькою поверхневою енергією на поверхні сплавів знижує адгезію різного роду покриттів і змазок [2].

Ефективним методом зміцнення поверхневих шарів титану для роботи в умовах фрикційної взаємодії є термодифузійне насичення, зокрема киснем -оксидування.

Відомо, що тверді та крихкі покриття на поверхні виробів, що працюють в умовах циклічних навантажень суттєво знижують їх ударну в'язкість та втомну міцність, а це неприпустимо для таких виробів, як лопатки газотурбінних двигунів та інших деталей в літако- та вертолітобудуванні. В той же час формування в поверхневих шарах твердих розчинів позитивно впливає як на їх твердість, так і на втомну міцність виробів за рахунок стискувальних напружень.

Мета роботи

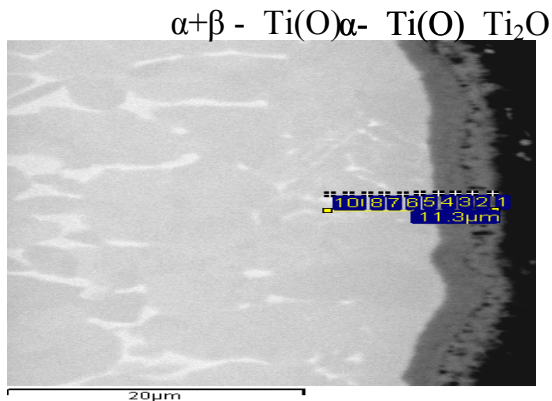
Метою даної роботи було показати можливість застосування оксидування для поверхневого зміцнення титанового сплаву VT6, яке б забезпечило утворення в дифузійній зоні твердого розчину і відсутність товстих шарів оксидів

Методика дослідження

Оксидування проводили в замкненому реакційному просторі при зниженому тиску впродовж 2 годин. Температура 550° була вибрана таким чином, щоб метал не насичувався азотом та воднем та на поверхні не утворювалися значні оксидні шари. Цьому сприяє також знижений тиск в реакційному просторі.

Результати дослідження

Насичення титанового сплаву VT6 киснем за таких умов не привело до формування значних оксидних шарів. На поверхні сплаву було виявлено тонкий шар до 1 мкм, що ідентифіковано як фазу Ti_2O_3 з гексагональною ґраткою, параметри якої $a = 2,9733 \text{ нм}$, $c = 4,7850 \text{ нм}$ (рис.1). Утворення цього шару стало можливе внаслідок великої термодинамічної активності титану до кисню при температурах, вищих за 500°С.



Spec trum	O	Al	Ti	V
1	29.2 2	5.44	50.6 7	1.36
2	35.5 7	0.67	62.1 6	1.6
3	31.0 5	0.66	63.9 8	4.31
4	24.3	1.56	66.6 1	7.53
5	14.7 1	4.46	87.2 6	3.57
6	5.0	3.59	91.6 7	4.75
7	4.21	3.96	86.4 2	9.62
8	4.07	4.93	91.5 4	3.53
9	3.81	4.99	91.3 2	3.68
10	3.78	4.26	83.9 5	11.7 8

Рис.1. Розподіл хімічних елементів по перерізу зразка сплаву VT6 після низькотемпературного оксидування (% мас.)

Під ним розташований твердий розчин кисню в $\alpha+\beta$ -титані. Товщина насиченої зони складала (80-85) мкм, мікротвердість змінювалася від (5.5-6.0) ГПа на поверхні до мікротвердості основного металу.

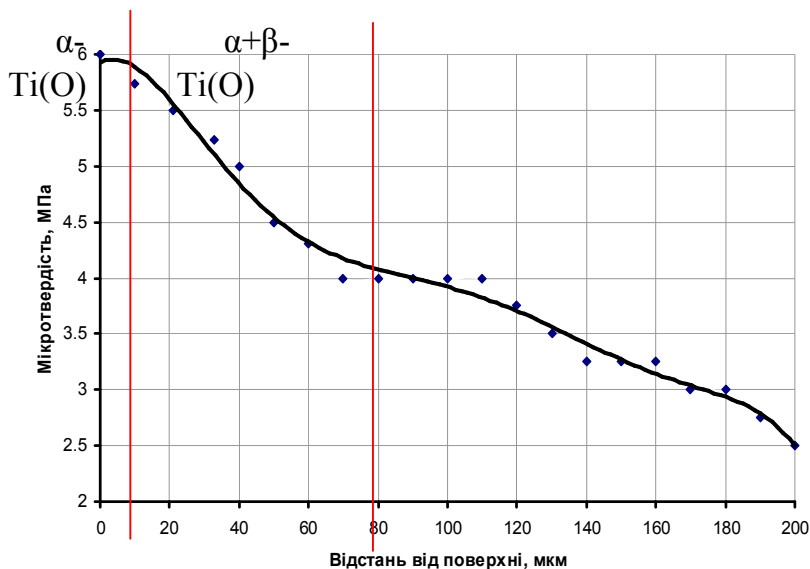


Рис. 2. Розподіл мікротвердості в дифузійному шарі на поверхні VT-6, отриманому після оксидування (550 °С, 2 год) .

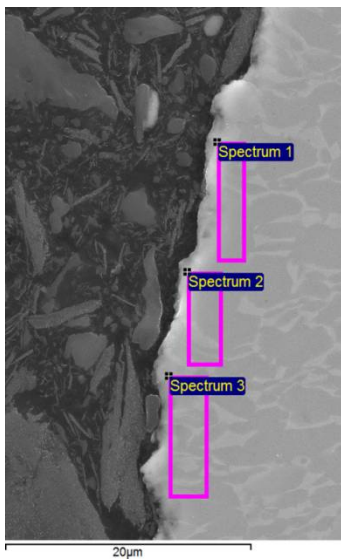
Наявність шару Ti₂O може виявитися корисним при експлуатації виробів з титанового сплаву. Доцільність утворення на поверхні титанових сплавів оксидних сполук титану була показана в роботі [3.]. Якщо при терті на поверхні титанового сплаву чи покриття на основі сполук титану утворюються тонкі шари TiO та TiO₂, які мають захисні властивості, вони ізолюють робочі поверхні від металу пари тертя. Хорошому зчепленню оксидних плівок з інструментом сприяє утворення твердого розчину, в якому кількість кисню до поверхні збільшується [то же]. Оксид Ti₂O на повітрі під дією зовнішніх навантажень та підвищених

температур легко окислюється до окислів вищої валентності $Ti_2O \rightarrow TiO \rightarrow Ti_2O_3 \rightarrow TiO_2$, що підтверджується термодинамічними розрахунками *Висновки*

Таким чином з аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що підвищення мікротвердості поверхневого шару дозволило збільшити зносостійкість в умовах абразивного зношування сплаву ВТ6 після оксидування в 1,5-1,8 рази.

Таким чином, в роботі показано позитивний вплив насичення поверхневого шару титанового сплаву ВТ6 киснем на його властивості.

Підвищеного вмісту азоту та водню в дифузійному шарі не визначено. Тільки на межі оксиду Ti_2O з $\alpha-Ti(O)$ визначено одночасне збільшення вмісту як азоту та і алюмінію в окремих ділянках (рис.3.6). Можна припустити, що в цих місцях утворюються дуже дисперсні включення нітридів алюмінію, але рентгенофазовим аналізом вони не фіксуються.



Spectrum	N	Al
1	0,69	6
2	2,5	5,54
3	1,13	5,36

Рис.3 Розподіл азоту та алюмінію по перерізу оксидованого сплаву ВТ6

Дифузійна зона вільна від надлишків азоту та водню. Окрихчування поверхні також не спостерігалось. Кисень не розповсюджується глибше, ніж 85 мкм, що дозволяє говорити про збереження властивостей основного матеріалу. Підвищення мікротвердості поверхневих шарів та наявність на поверхні тонкого оксидного шару повинно сприяти покращенню фрикційних властивостей сплаву ВТ6 та запобіганню задиранню і наволачиванню металу в з'єднаннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Технология производства титановых самолетных конструкций / [А.Г.Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков и др.] – М.: Машиностроение, 1995. – 448с.
2. Исследование влияния повышения содержания кислорода на механические свойства, механизм разрушения и структуру в промышленных сплавах титана / А. А. Скребцов, А. В. Овчинников / Тезы докладов Четвертой международной научно-технической конференции авиамоторостроительной отрасли, (Запорожье – Алушта, 17 – 21 мая 2010 г.). – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2010. – 272 с.
3. Триботехнические свойства покрытий на титановых сплавах / П. В.Назаренко, И. Е. Полищук, А. Г. Моляр [и др]. // Фіз.-хім. Механіка матеріалів. – 1998. - №2 – С. 55 – 62

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



**МІЖНАРОДНА
НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
«МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РОБОТИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ – 9»**

ІФФ-МОНБ

ПРОГРАМА

18 – 19 грудня 2019 р.

Київ, Україна