

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра загальної та прикладної фізики**

Освітньо-професійна програма «Прикладна фізика»

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

**на тему: «Хіміко-термічна обробка спеціальних сталей
авіаційного призначення»**

Виконав: студент _ 2 курсу, групи 8.1050
спеціальності 105 прикладна фізика та наноматеріали
(шифр і назва спеціальності)

М.О. Ткаліч
(ініціали та прізвище)

Керівник професор, д-р техн.н. Міщенко В.Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доцент, канд техн. н. Климов О.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет математичний

Кафедра загальної та прикладної фізики

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 105 прикладна фізика

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
загальної та прикладної фізики
д.пед.н., професор

Андрєєв А.М.

(підпис)

« » 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Ткалічу Марку Олександровичу

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи Хіміко-термічна обробка спеціальних сталей авіаційного призначення

керівник роботи Міщенко Валерій Григорович, доктор техн. н., проф.

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом ЗНУ від « 09 » червня 2021 року № 851-с

2. Строк подання студентом роботи

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження: теплостійка цементована сталь

09Х3НМЗФБч для виготовлення зубчастих коліс авіаційного редуктора. Методи

дослідження: металографічні, рентгеноструктурні дослідження та механічні випробування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд

2. Матеріали та методи дослідження

3. Результати та їх обговорення

4. Висновки

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

Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Міщенко В. Г., д. техн. н., проф.	26.05.2021	18.06.2021
2	Міщенко В. Г., д. техн. н., проф.	15.06.2021	09.09.2021
3	Міщенко В. Г., д. техн. н., проф.	10.09.2021	22.10.2021
4	Міщенко В. Г., д. техн. н., проф.	11.09.2021	23.10.2021

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний пошук	20.04.2021	виконано
2.	Оформлення літературного огляду	11.06.2021	виконано
3.	Проведення ХТО сталі 09ХЗНМЗФБч	13.09.2021	виконано
4.	Металографічне дослідження зразків	29.09.2021	виконано
5.	Рентгеноструктурний аналіз зразків	14.10.2021	виконано
6.	Випробування механічних властивостей сталі	19.10.2021	виконано
7.	Оформлення дипломної роботи	25.11.2021	виконано
8.	Корегування дипломної роботи згідно з вимогами ДСТУ	08.12.2021	виконано

Студент _____

(підпис)

М. О. Ткаліч _____

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____

(підпис)

В. Г. Міщенко _____

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____

(підпис)

В. І. Меньяло _____

(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Хіміко-термічна обробка спеціальних сталей авіаційного призначення»: 49 с., 18 рис., 5 табл., 35 джерел.

ГРАНИЦЯ МІЦНОСТІ, ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО, ЛІКВАЦІЯ, МІКРОСТРУКТУРА, ТЕПЛОСТІЙКА ЦЕМЕНТОВАНА СТАЛЬ, УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ, ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА

Об'єкт дослідження – теплостійка цементована сталь 09ХЗНМЗФБч.

Мета роботи – вибір раціонального режиму хіміко-термічної обробки поверхні заготовки зубчатих коліс.

Методи дослідження – металографічне, рентгеноструктурне дослідження та механічні випробування.

Актуальність теми зумовлено необхідністю забезпечити довготривалу безперервну роботу зубчастих коліс авіаційного редуктора при високих температурах порядку 400-450°C.

Експериментально визначено, що найкращим методом хіміко-термічної обробки (ХТО) для зубчатих коліс зі сталі марки 09ХЗНМЗФБч є високотемпературна цементация.

За результатами випробувань встановлено, що сталь мала дещо занижені показники межі міцності та ударної в'язкості; відносне подовження та відносне звуження відповідали вимогам ТУ. Випробування на контактну витривалість показали, що витривалість сталі 09ХЗНМЗФБч у п'ять разів перевищує відповідні показники сталі ВКС-5. Розроблені режими хіміко-термічної обробки дозволили збільшити теплостійкість сталі до 450°C та зменшили тривалість процесу хіміко-термічної обробки.

SUMMARY

Qualification work of the master "Chemical and thermal treatment of special steels for aviation": 49 p., 18 figures, 5 tables, 35 sources.

CARBURIZING STEEL, GEAR WHEEL, IMPACT VISCOSITY, MICROSTRUCTURE, SEGREGATION, STEEL, STRENGTH LIMIT, THERMOCHEMICAL TREATMENT

The object of research is heat-resistant cemented steel 09Cr3NiMo3VNbr.

The purpose of the work - the choice of a rational mode of chemical and thermal treatment of the surface of the workpiece gears.

Research methods - metallographic, X-ray structural research and mechanical tests.

The urgency of the topic is due to the need to ensure long-term continuous operation of the gears of the aircraft reducer at high temperatures of about 400-450°C.

It has been experimentally determined that the best method of chemical-heat treatment (CHT) for gear wheels made of steel grade 09Cr3NiMo3VNbr is high-temperature cementation.

According to the test results, it was found that the steel had a slightly lower strength and toughness, relative elongation and relative narrowing met the requirements of the TU. Contact strength tests have shown that the strength of 09Cr3NiMo3VNbr steel is five times higher than that of VKS-5 steel. The developed modes of chemical-heat treatment allowed to increase the heat resistance of steel to 450°C and reduced the duration of the process of thermochemical treatment.

ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну роботу.....	2
Реферат.....	4
Summary.....	5
Вступ.....	7
1 Огляд літератури.....	7
1.1 Способи зміцнення поверхні конструкційних сталей методом хіміко-термічної обробки.....	8
1.2 Види хіміко-термічної обробки.....	10
1.3 Обґрунтування раціонального матеріалу для вторинного твердіння.....	15
1.4 Вибір режимів ХТО для отримання високої твердості цементованого шару поверхні вибраної сталі.....	17
1.5 Вибір раціонального режиму ХТО для зубчатих коліс авіаційних редукторів.....	18
Висновки за розділом 1.....	24
2 Обґрунтування вибору матеріалу та способу хто для вторинного твердіння поверхні виробів.....	26
2.1 Обґрунтування мети дослідження.....	26
2.2 Методика та обладнання для ХТО на вторинне твердіння.....	27
2.3 Виготовлення об'єктів для мікроструктур.....	29
2.4 Методика рентгеноструктурного аналізу.....	29
3 Структуроутворення поверхневого шару вторинно твердіючої цементованої сталі 09Х3МЗНФБч.....	31
3.1 Мікроструктури зразків сталі після ХТО.....	31

3.2 Випробування механічних властивостей поверхневого шару після ХТО.....	35
Висновки за розділом 3.....	40
4 Дослідження експлуатаційних характеристик поверхневого шару сталі 09Х3МЗНФБч.....	42
Висновки за розділом 4.....	43
Висновки.....	44
Список використаних джерел.....	45

ВСТУП

У зв'язку з розвитком авіаційної промисловості, з появою нових моделей літаків, вертольотів, як пасажирського, так і спеціального призначення, все більше і більше уваги приділяється надійності роботи комплектуючих частин, а саме: лопастей, турбін, двигунів, редукторів, тощо. У представленій роботі розглядається проблема міцності зубчастих коліс авіаційного редуктора, бо саме вони є основою передачі крутного моменту. Актуальність теми зумовлено необхідністю забезпечити довготривалу безперервну роботу зубчастих коліс авіаційного редуктора при високих температурах порядку 400-450°C.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у виборі раціонального режиму хіміко-термічної обробки поверхні заготовки зубчатих коліс.

Об'єкт дослідження – теплостійка цементована сталь 09ХЗНМЗФБч. Предметом кваліфікаційної роботи є дослідження процесів цементації на вторинне твердіння. Основна задача роботи полягає у виборі ефективних умов методу цементації сталі, які дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики зубчатих коліс авіаційного редуктора при значному скороченні процесу хіміко-термічної обробки (ХТО).

Матеріал кваліфікаційної роботи викладено у чотирьох частинах: літературний огляд, матеріал та методика дослідження, структуроутворення поверхневого шару вториннотвердіючої цементованої сталі 09ХЗМЗНФБч, дослідження експлуатаційних характеристик виробу.

Експериментально встановили, що найкращим методом ХТО для зубчатих коліс зі сталі марки 09ХЗНМЗФБч є високотемпературна цементація. Практична значущість – отримані результати можуть бути використані в розробці та виготовленні більш стійких до навантажень та високих температур деталей і заготовок у авіапромисловості.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Способи зміцнення поверхні конструкційних сталей методом хіміко-термічної обробки

Хіміко-термічною обробкою називається процес поверхневого насичення сталі різними елементами, процес зміни хімічного складу, мікроструктури й властивостей поверхневого шару деталі.

Хіміко-термічну обробку використовують для поліпшення механічних і корозійних властивостей сталей і сплавів, підвищуючи поверхневу твердість і, як наслідок, зносостійкість виробу.

Зміна хімічного складу поверхневих шарів досягається в результаті їхньої взаємодії з навколишнім середовищем (твердим, рідким, газоподібним, плазмовим), у якому здійснюється нагрівання. У результаті зміни хімічного складу поверхневого шару змінюються його фазовий склад і мікроструктура.

Основними параметрами хіміко-термічної обробки є температура нагрівання й тривалість витримки. Мета хіміко-термічної обробки - поверхневе зміцнення металів і сплавів і підвищення їх стійкості проти впливу зовнішніх агресивних середовищ при нормальній і підвищеній температурах [1].

Процеси хіміко-термічної обробки складаються із трьох стадій:

- дисоціації, яка полягає в розпаді молекул і утворенні активних атомів елемента, що дифундує (наприклад, дисоціація оксиду вуглецю $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ або аміаку $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$);

- адсорбції, тобто контактування атомів елемента, що дифундує, з поверхнею сталевих виробів й утворенні хімічних зв'язків з атомами металу;

- дифузії, тобто проникнення елемента, що насичує, углиб металу.

Швидкість дифузії при проникненні атомів, що дифундують, у ґратки розчинника буде вищою, якщо при взаємодії утворюється тверді розчини проникнення, і значно нижчою, якщо утворюються тверді розчини заміщення [2].

Концентрація дифундуючого елемента на поверхні залежить від надходження атомів цього елемента до поверхні й від швидкості дифузійних процесів, тобто відводу цих атомів углиб металу.

Товщина дифузійного шару залежить від температури нагрівання, тривалості витримки при насиченні й концентрації дифундуючого елемента на поверхні [3].

Чим вища концентрація дифундуючого елемента на поверхні деталі, тим більша товщина шару. Чим вища температура процесу, тим більша швидкість дифузії атомів та відповідно зростає товщина дифузійного шару. Межі зерен є ділянками, на яких дифузійні процеси полегшуються через наявність великої кількості дефектів кристалічної будови. Якщо розчинність дифундуючого елемента у металі є незначною, то часто спостерігається переважна дифузія по межах зерен. При значній розчинності дифундуючого елемента у металі роль прикордонних шарів зменшується. У момент фазових перетворень дифузія протікає швидше [4].

З метою підвищення теплостійкості зубчастих коліс редукторів газотурбінних двигунів (ВМД) до 670-720 К можуть застосовуватися цементовані вториннотвердіючі сталі 13Х3НВМ2Ф (ВКС-4) та 13Х3НЗМ2ВФБ (ВКС-10). При знижених температурах (~570 К) використовують переважно сталі 12Х2НВФА, 14ХГСН2МА, 13Х3НВМ2Ф, 16Х3НВФМБ (ВКС-5), М50NiL [5].

Згадані вище марки сталей піддають процесу ХТО та високотемпературній витримці в насичуючому середовищі, параметри якого і визначають кінетику процесу дифузійного насичення поверхні атомами

вуглецю, азоту та інших елементів. При цьому існують фактори, що негативно впливають на якість продукції, такі як: раптове припинення дифузійного насичення з плином часу в процесі витримки, процеси обезвуглецювання, деазотування та перевищення заданої концентрації насичувального елемента поверхні.[6, 7]

Узагальнюючи вищесказане доходимо висновку, що при ХТО необхідно прагнути до формування заданих параметрів дифузійного шару та отримання оптимальних фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

1.2 Види хіміко-термічної обробки

У промисловості застосовують багато способів хіміко-термічної обробки, які відрізняються елементами, дифузуючим типом і складом зовнішнього середовища, хімізмом процесів у ній, технікою виконання й іншими ознаками. Залежно від агрегатного стану зовнішнього середовища, у яке поміщають оброблюваний виріб, розрізняють хіміко-термічну обробку у твердому, рідкому і газовому середовищах.

Основними різновидами хіміко-термічної обробки є:

- цементація (насичення поверхневого шару вуглецем);
- азотування (насичення поверхневого шару азотом);
- нітроцементація або ціанування (насичення поверхневого шару одночасно вуглецем і азотом);
- дифузійна металізація (насичення поверхневого шару різними металами) [8].

Якщо джерелом елемента, що насичує, є тверда фаза, атоми дифундуючого елемента надходять із твердої речовини в місця прямого контакту його з поверхнею виробу. Цей процес малоефективний і

застосовується рідко. Зазвичай тверде середовище використовують для створення активної газової або парової фази, з якої атоми елемента, що насичує, надходять у виріб. Наприклад, при цементації у твердому карбюризаторі (деревному вугіллі) атоми вуглецю, що дифундують у сталь, утворюються з оксиду вуглецю ($2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$), а деревне вугілля є необхідним лише для утворення газової фази. Інший приклад - дифузійне хромування в твердому середовищі, коли виріб упакований з порошком хрому або ферохрому. При нагріванні хром випаровується і його атоми надходять у виріб головним чином з парової фази, а не в місцях прямого контакту порошку з поверхнею виробу. При хіміко-термічній обробці в рідкому середовищі атоми елемента, що дифундує у виріб, утворюються в результаті хімічних реакцій у розплавленій солі (наприклад, в NaCN при ціануванні сталі) або надходять безпосередньо з розплавленого металу (наприклад, з розплаву алюмінію при дифузійному алюмініуванні сталі).

При хіміко-термічній обробці в газовому середовищі дифундуючий елемент утворюється у результаті реакцій дисоціації ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$), диспропорціонування ($2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$), обміну ($\text{CrCl}_2 + \text{Fe} \rightarrow \text{Cr} + \text{FeCl}_2$), відновлення ($\text{VCl}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{V} + 2\text{HCl}$) [9].

Газове середовище й активна газова фаза, що утворюються при нагріванні у твердому середовищі, у промислових процесах служать найпоширенішими постачальниками атомів елементів, якими збагачуються поверхневі шари виробу.

Для хіміко-термічної обробки найбільш зручне чисто газове середовище: його склад легко регулювати, воно швидко прогрівається до заданої температури, дозволяє повністю механізувати й автоматизувати процес хіміко-термічної обробки, одночасно проводити загартування (без повторного нагрівання) [10].

Наведені приклади показують, що класифікація методів хіміко-термічної обробки по агрегатному стану середовища, у яке поміщено виріб, не завжди узгоджується з фізико-хімічною сутністю процесу обробки.

Ґрунтуючись на фізико-хімічній характеристиці активної фази, що поставляє дифундуючий елемент, запропоновано наступну класифікацію методів хіміко-термічної обробки: насичення із твердої фази, насичення з парової фази, насичення з газової фази й насичення з рідкої фази. Згідно з цією класифікацією цементацію сталі у твердому карбюризаторі слід відносити до методу насичення з газової фази, а дифузійне хромування в порошку хрому - до методу насичення з парової фази [11].

За характером зміни хімічного складу оброблюваного виробу всі різновиди хіміко-термічної обробки можна розділити на три групи: дифузійне насичення неметалами, дифузійне насичення металами й дифузійне видалення елементів. Ці групи включають різноманітні промислові процеси хіміко-термічної обробки.

Кожний процес хіміко-термічної обробки може здійснюватись різними методами (насиченням з газової, парової, рідкої або твердої фази) і в найрізноманітнішому технічному виконанні (наприклад, з одержанням активної газової фази в робочому просторі печі або в окремому генераторі й т.п.).

Цей вид обробки відноситься головним чином до сталей, тому що хіміко-термічну обробку чавунів і кольорових металів та сплавів у промисловості застосовують незрівнянно рідше.

Дифузійна металізація - це процес дифузійного насичення поверхневих шарів сталі різними металами. Вона може здійснюватися у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

При дифузійній металізації у твердих середовищах застосовують порошкоподібні суміші, що складаються із феросплавів з додаванням хлориду амонію в кількості 0,5-5%.

Рідка дифузійна металізація здійснюється зануренням деталі в розплавлений метал (наприклад, цинк, алюміній).

При газовому способі насичення застосовують леткі хлоридні сполуки металів, які утворюються при взаємодії хлору з металами за високих температур. Поверхнєве насичення сталі металами проводиться при температурі 900–1200°C [12].

Дифузія металів у залізо відбувається значно повільніше, ніж вуглецю й азоту, тому що вуглець і азот утворюють із залізом тверді розчини проникнення, а метали - тверді розчини заміщення. У результаті дифузійні шари при металізації виходять у десятки разів більш тонкими.

Алітуванням називається процес насичення поверхні сталі алюмінієм. У результаті алітування сталь здобуває високу окалиностійкість і корозійну стійкість в атмосфері й у ряді середовищ.

При алітуванні в порошкоподібних сумішах чисті деталі разом із сумішшю запаковують у залізний ящик.

Вартість алітування сталі металізацією з наступним дифузійним відпаленням у кілька раз дешевша, ніж алітування у порошках.

Хромування проводять для підвищення корозійної стійкості, кислотостійкості, окалиностійкості тощо. Хромування середньо- і високовуглецевих сталей підвищує їхню твердість і зносостійкість [13].

Хромування найчастіше проводять у порошкоподібних сумішах. Процес відбувається при температурі 1000–1050°C. Дифузійний шар при хромуванні вуглецевих сталей складається з карбідів хрому. Карбідний шар має високу твердість HV 12000–13000. Товщина хромованого шару досягає 0,15–0,20 мм при тривалості процесу 6–15 годин. Чим більше вуглецю в сталі, тем менша товщина шару.

Боруванням називають насичення сталі бором. Борування проводять із метою підвищення стійкості проти абразивного зношування. Товщина борованих шарів не перевищує 0,3 мм, твердість HV 18000-20000.

Силіціюванням називається процес насичення поверхні сталі кремнієм. У результаті силіціювання сталь здобуває високу корозійну стійкість у морській воді, у різних кислотах і підвищену зносостійкість. Крім того, силіціювання різко підвищує окалинотійкість молібдену та деяких інших металів і сплавів.

Дифузійна металізація - процес дороговартісний, здійснюється при високих температурах (1000–1200°C) протягом тривалого часу.

Однією з основних властивостей металізованих поверхонь є жаростійкість, тому жаростійкі деталі для робочих температур 1000–1200°C виготовляють із простих вуглецевих сталей з наступним алітуванням, хромуванням або силіціюванням.

Цементациєю називається процес насичення поверхневого шару сталевих виробів вуглецем. Цементация здійснюється з метою одержання високої твердості на поверхні виробу при збереженні грузлої серцевини, вона сприяє підвищенню зносостійкості й межі витривалості.

Нітроцементация - газове ціанування, здійснюється в газових сумішах із цементуючого газу й дисоціюючого аміаку.

Склад газу і температура процесу визначають співвідношення вуглецю й азоту в ціанованому шарі. Глибина шару залежить від температури й тривалості витримки.

Нітроцементация характеризується безпекою в роботі, низькою вартістю. Крихкість шару виникає при пересиченні шару вуглецем і азотом, коли утворюється суцільна кірка карбонітридів біля поверхні [14].

1.3 Обґрунтування раціонального матеріалу для вторинного твердіння

Одним з основних видів сталей є конструкційні. Конструкційні сталі, застосовувані для виготовлення відповідних конструкцій, деталей і приладів, повинні відповідати наступним вимогам:

1) мати високу конструктивну міцність, тобто володіти певним комплексом механічних властивостей, що забезпечують тривалу й надійну роботу матеріалу в умовах служби;

2) мати хороші технологічні властивості - хорошу оброблюваність тиском, різанням, зварюваність.

Конструкційні сталі являють собою найбільш велику форму, призначену для виготовлення будівельних споруджень, деталей машин і приладів. Серед них можна виділити цементовні, високоміцні й рессорно-пружинні сталі.

Для конструкційних сталей важливо також, щоб вони містили можливо менше дорогих і дефіцитних легувальних елементів. Вимога забезпечення конструктивної міцності є визначальною.

Леговані сталі роблять якісними, високоякісними й особливо високоякісними. Їх, як правило, застосовують після загартування й відпустки; у відпаленому стані вони за механічними властивостями практично не відрізняються від вуглецевих.

Легувальні елементи вводяться для підвищення конструктивної міцності сталі. Поліпшення механічних властивостей обумовлене впливом легуючих елементів на властивість фериту, дисперсність карбідної фази, стійкість мартенситу при відпустці, відпалюваність, розмір зерна [15].

Конструкційні леговані сталі застосовують в будівництві, машинобудуванні, приладобудуванні і т.д. У порівнянні з вуглецевими леговані сталі мають сприятливу комбінацію міцності, пластичності й в'язкості, а також

високу холодостійкість. З них виготовляють рами машин і вагонів, металоконструкції промислових будинків, прогінні мостів і естакад, магістральні нафто- і газопроводи. У машинобудуванні з легованих сталей виготовляють деталі відповідального призначення - шестерні, штовхальники, осі, плунжери, гайки, болти, черв'яки, кулачки, зірочки, ресори, пружини, зварні конструкції в літакобудуванні, шпинделі, вали і т.д.

У конструкційних сталях ферит - основна структурна складова, багато в чому визначальна для їхніх властивостей. Легувальні елементи, розчиняючись у фериті, зміцнюють його.

Більшість легувальних елементів подрібнює зерно, що сприяє підвищенню роботи розвитку тріщини й зниженню порогу холодноламкості.

Хром водять до 3%. Він розчиняється у фериті й цементиті, виявляючи сприятливий вплив на механічні властивості сталі. До того ж хром відноситься до недефіцитних легувальних елементів, що визначило його широке застосування в конструкційних сталях.

Для зміни основних експлуатаційних якостей металів досить часто проводиться процес легування. Він передбачає включення до основного складу металу додаткових хімічних елементів, які здатні змінити певні властивості. Процес легування настільки розповсюджений, що більшість сучасних металів відноситься саме до цієї групи. Прикладом можна назвати сталь 09ХЗНМЗФБч [16].

Вона є представником групи конструкційних сталей, але при цьому до складу був доданий хром для покращення експлуатаційних якостей металу.

Конструкційна легована хромиста сталь 09ХЗНМЗФБч використовується для виготовлення цементованих деталей з високою твердістю поверхні й низькою міцністю серцевини, які працюють при терті на зношування - шестірні, втулки, гільзи, обойми, плунжери, диски, важелі, інша продукція [16]

1.4 Вибір режимів ХТО для отримання високої твердості цементованого шару поверхні вибраної сталі

Вибір виду хіміко-термічного зміцнення робочих поверхонь залежить від конструктивно-технологічних особливостей і експлуатаційних характеристик деталей. Для забезпечення контактної витривалості, витривалості зубів при вигині, стійкості до заїдання доцільно застосовувати цементацію, а для забезпечення високої твердості поверхні, зносостійкості й високої теплостійкості робочої поверхні - азотування. Газотурбінний двигун (ГТД) Красний-31Ф включає 115 цементованих деталей, серед яких основними є зубчасті колеса, що включають 88 типорозмірів. Номенклатура авіаційних деталей редукторів і приводів газотурбінних двигунів, які зміцнюються азотуванням, нараховує більш 200 найменувань. ХТО металів і сплавів, як з метою їх поверхневого зміцнення, так і для захисту від корозії, підвищує надійність і довговічність деталей машин.

ХТО включає такі основні взаємозалежні стадії:

- 1) утворення активних атомів у середовищі, що насичує, і дифузію їх до поверхні оброблюваного металу;
- 2) адсорбція утворених активних атомів на поверхні металу;
- 3) дифузійне переміщення адсорбованих атомів усередину металу.

Важливим етапом ХТО є дифузія. У металах при утворенні твердих розчинів заміщення дифузія в основному відбувається за вакансійним механізмом. При утворенні твердих розчинів проникнення реалізується механізмом міжвузлової дифузії. Розвиток процесу дифузії приводить до утворення дифузійного шару - поверхні насичення, що відрізняється від вихідного матеріалу деталі за хімічним складом, структурою й властивостями. Матеріал деталі під дифузійним шаром, не порушений впливом активного середовища, що насичує, називається серцевиною. Загальна товщина

дифузійного шару - найкоротша відстань від поверхні насичення до серцевини. Ефективна товщина дифузійного шару - найкоротша відстань від поверхні насичення до мірної ділянки, яка відрізняється встановленим граничним номінальним значенням базового параметра [17].

Базовий параметр дифузійного шару - параметр матеріалу, який слугує критерієм зміни якості залежно від відстані від поверхні насичення. Перехідна зона дифузійного шару - прилягаюча до серцевини внутрішня частина дифузійного шару, довжина якої визначається різницею загальної й ефективної товщин.

При здійсненні ХТО з використанням порошкових сумішей для досліджуваних зразків було використано сталь 09ХЗНМЗФБч-Ш, що застосовується при виготовленні зубчастих коліс редукторів.

У випадку боросиліціювання насичення проводили при температурах 900–1000°C протягом 1–5 годин. Процес борокарбоазотування - при 500–550°C протягом 0,5–8 годин. Ці режими дозволяють проаналізувати закономірності формування шарів із заданою структурою й властивостями при необхідних показниках товщини дифузійного покриття.

Застосовувані методи насичення дозволяють одержати на данній сталі дифузійні шари з високим комплексом заданих властивостей, що дозволяє виготовляти деталі, які будуть працювати в умовах зношування при динамічних впливах [18].

1.5 Вибір раціонального режиму ХТО для зубчастих коліс авіаційних редукторів

У науковій літературі, присвяченій проблемі зміцнення зубчастих коліс авіаційних редукторів, приділяється увага процесу цементації.

Цементациі піддають деталі з низьковуглецевих сталей (до 0,25%), що працюють в умовах контактного зношування й знакозмінних навантажень (авіадвигуни, втулки, поршневі пальці, кулачки, стовпчики і т.д.).

Для цементациі деталі надходять після механічної обробки із припуском на шліфування 0,05-0,10 мм. Ділянки, що не підлягають цементациі, захищають тонким шаром міді, яку наносять електричним способом, або спеціальними обмазками із суміші вогнетривкої глини, піску й азбесту, замішаних на рідкому склі.

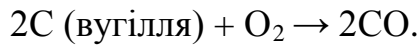
Цементация здійснюється при температурах вище 900–950°C. Чим менше вуглецю в сталі, тем вище температура нагрівання для цементациі. При цих температурах атомарний вуглець адсорбується на поверхні сталі й дифундує в глиб металу.

У результаті цементациі вміст вуглецю в поверхневому шарі становить 0,8-1,0%. Більш висока концентрація вуглецю сприяє крихкості цементованного шару.

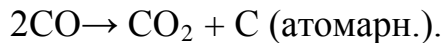
Середовище, у якому проводять цементацию, називають карбюризатором.

Цементация у твердому середовищі. Карбюризатором є активоване деревне вугілля, а також кам'яновугільний напівкокс і торф'яний кокс. Для прискорення процесу до деревного вугілля додають активізатори - вуглекислий барій, кальциновану соду, поташ у кількості 10-40% від маси вугілля. Звичайна робоча суміш, яка застосовується для цементациі, складається з 25-35% свіжого карбюризатора й 65-75% відпрацьованого [19].

Підготовлені для цементациі вироби укладають у металевий ящик. Попередньо в ящик насипають шар карбюризатора 20-30 см. Деталі вкладають шарами на відстані 10-15 мм один від одного. Кожен шар деталей засипають карбюризатором і на нього укладають наступний шар деталей. При нагріванні вуглець деревного вугілля, з'єднуючись із киснем повітря, що перебуває в цементацийному ящику між частками карбюризатора, утворює оксид вуглецю:



У контакті із залізом оксид вуглецю дає атомарний вуглець:



Підвищення температури цементації до 950–1000°C дозволяє значно прискорити процес, але такий режим застосовують для початково дрібнозернистих сталей [20].

Після цементації деталі піддають нормалізації для здрібнювання зерна, повторному загартуванню й низькотемпературному відпуску. У результаті такої обробки поверхневий шар має структуру мартенситу із включеннями надлишкових карбідів із твердістю HRC 60-63.

Недоліками даного способу є:

- значні витрати часу (1 година для цементації на глибину 0,1 мм);
- низька продуктивність процесу;
- громіздке обладнання;
- складність автоматизації процесу.

Спосіб застосовується в дрібносерійному виробництві.

Цементація пастами. Процес полягає в нанесенні на поверхню оброблюваної деталі шару речовини у вигляді суспензії, обмазки або шликеру; потім сушіння й нагрівання. Вид пасти визначає технологію її нанесення. Паста порівняно рідкої консистенції наноситься на деталі зануренням, а більш густа за допомогою кисті. Товщина шару пасти повинна бути в 6-8 раз більше заданої глибини цементованного шару. Основними компонентами паст є сажа й кальцинована сода, кокс малосірчаний, сода або поташ [21].

Висушені деталі акуратно, щоб не ушкодити шар пасти, укладають одна на іншу в ящик і закривають його кришкою. Ящик завантажують у піч із температурою 950–1050°C; чим вище температура нагрівання, тем менше тривалість процесу. Крім того, для нагрівання деталей можна застосовувати струми високої й промислової частоти.

По закінченню витримки деталі прохолоджують у ящиках на повітрі. Можна здійснити також охолодження до гартівної температури й зробити загартування безпосередньо із цементацийного нагрівання.

Газова цементация. У теперішній час газова цементация є основним процесом цементации на заводах масового виробництва. При газовій цементации скорочується тривалість процесу, тому що відпадає необхідність прогріву ящиків, можна забезпечувати більш повну механізацію й автоматизацію процесу, спрощується наступна термічна обробка й, найголовніше, можна одержати задану концентрацію вуглецю в шарі [22, 23].

Цементацию виконують у шахтних, муфельних або безмуфельних печах та печах безперервної дії.

При цементации в шахтних печах для одержання вуглецюючої атмосфери застосовують метан, гас, бензол.

У печах безперервної дії частіше використовують метан. Для одержання заданої концентрації вуглецю застосовують атмосфери з регульованим потенціалом вуглецю.

Під вуглецевим потенціалом атмосфери розуміють певну концентрацію вуглецю на поверхні цементованного шару. Для прискорення процесу вуглецевий потенціал атмосфери в печі міняють по зонах. Спочатку його підтримують високим, щоб забезпечити одержання в поверхневому шарі концентрацію вуглецю 1,3-1,4%, а потім його знижують для одержання в цьому шарі оптимального вмісту вуглецю 0,8% [24, 25].

Глибина цементации визначається температурою нагрівання й часом витримки.

Переваги способу:

- можливість одержання заданої концентрації вуглецю в шарі (можна регулювати вміст вуглецю, змінюючи співвідношення складових газів атмосфери);

- скорочення тривалості процесу за рахунок спрощення наступної термічної обробки;

Спосіб застосовується в серійному й масовому виробництві.

Цементация є проміжною операцією, мета якої - збагачення поверхневого шару вуглецем. У результаті цементации досягається рівномірний розподіл вуглецю по перетину.

Остаточно формує властивості цементованої деталі наступна термообробка. Усі вироби піддають загартуванню з низьким відпуском. Після загартування цементований виріб отримує високу твердість і зносостійкість, підвищується межа контактної витривалості й межа витривалості згинання при збереженні грузлої серцевини.[26, 27]

Комплекс термічної обробки залежить від матеріалу й призначення виробу.

Графіки різних комплексів термічної обробки представлено на рис. 1.

Якщо сталь дрібнозерниста або вироби невідповідального призначення, то проводять однократне загартування за температури 820–850°C. При цьому забезпечується одержання високовуглецевого мартенситу в цементованому шарі, а також часткова перекристалізація й здрібнювання зерна серцевини.

При газовій цементации вироби по закінченню процесу охолоджують до цих температур, а потім проводять загартування (повторне нагрівання під загартування не потрібне).

Для задоволення особливо високих вимог, які висуваються до механічних властивостей цементованих деталей, застосовують подвійне загартування. Перше загартування (або нормалізація) проводиться за температури 880–900°C для виправлення структури серцевини. Друге загартування проводиться за температури 760–780°C для одержання дрібногочастого мартенситу в поверхневому шарі [29].

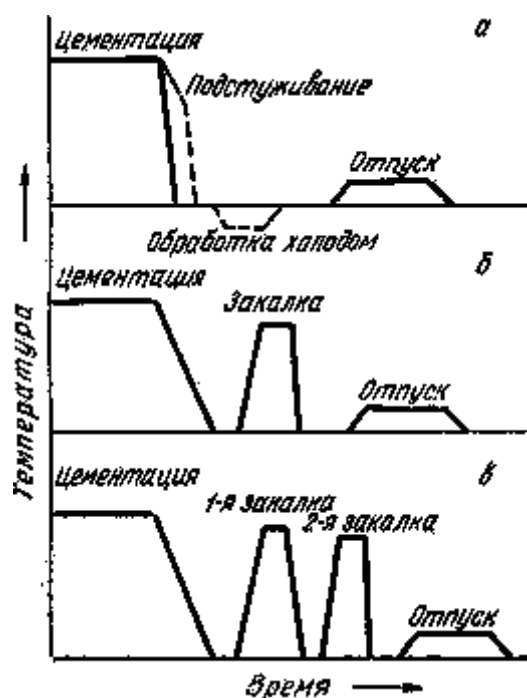


Рисунок 1.1. - Режимы термічної обробки цементованих виробів [28]

Завершальною операцією термічної обробки завжди є низький відпуск, проведений при температурі 150–180°C. У результаті відпуску в поверхневому шарі одержують структуру мартенситу відпуску, частково знімаються напруги. Цементациї піддають зубчасті колеса, поршневі кільця, осі, ролики.

Одним з недоліків процесу цементациї є тривалість технологічного процесу. Найбільш реальний шлях прискорення процесу цементациї - підвищення температури. Однак стосовно цементациї в прохідних печах (насичення на товщину до 1,5 мм) підвищення температури є малоефективним, тому що при цьому збільшується час нагрівання до температури насичення, час охолодження до температури загартування, а також скорочується термін служби оснащення цементацийної печі.

Вакуумна цементация. Значне прискорення процесу може бути досягнуте в результаті використання високотемпературної двоступінчастої цементациї (з високим вуглецевим потенціалом на першому етапі) при тиску нижче атмосферного (вакуумна цементация).

Процес вакуумної цементації має ряд переваг перед звичайним процесом цементації: відсутність газопідготовчих установок і приладів контролю вуглецевого потенціалу; скорочення тривалості процесу в результаті проведення його при високій температурі й зміни потенціалу атмосфери; одержання світлої поверхні деталей після цементації; відсутність кисневмісних компонентів в атмосфері виключає внутрішнє окиснення деталей; поліпшення умов праці; зменшення питомої витрати електроенергії й технологічного газу; більша мобільність устаткування (пуск і зупинка займають кілька хвилин); більш висока культура виробництва; краще проникнення газу-карбюратора в отвори малого діаметру, що забезпечує рівномірну цементацію внутрішніх порожнин. Недоліком вакуумної цементації є висока вартість устаткування [30, 31].

Цементация в тліючому розряді (іонна цементация). В останні роки деяке застосування одержала іонна цементация (цементация в плазмі тліючого розряду). Тліючим розрядом називають один з видів газового розряду, у якому катод випускає електрони в результаті бомбардування позитивними іонами й фотонами, що утворюються в газі. Основними процесами при обробці в тліючому розряді є катодне розпилення, тобто видалення атомів з поверхні катоду за рахунок бомбардування його іонами газу, та дифузійне насичення поверхневих шарів різними елементами (N, C, B і ін.) [32].

Висновки за розділом 1

Таким чином, хіміко-термічна обробка металів - це нагрівання й витримка металевих матеріалів при високих температурах у хімічно активних середовищах (твердих, рідких, газоподібних).

У переважній більшості випадків хіміко-термічну обробку проводять із метою збагачення поверхневих шарів виробів певними елементами.

У результаті ХТО формується дифузійний шар, тобто змінюється хімічний склад, фазовий склад, структура й властивості поверхневих шарів. Зміна хімічного складу обумовлює зміни структури й властивостей дифузійного шару.

Широке промислове застосування одержали тільки традиційні процеси насичення: азотування, цементация, нітроцементация, ціанування. Цинкування, алітування, борування, хромування, силіціювання застосовують в меншій мірі.

На практиці в переважній більшості випадків ХТО піддають сплави на основі заліза (сталі й чавуни), рідше - сплави на основі тугоплавких металів, тверді сплави й ще рідше сплави кольорових металів, хоча практично всі метали можуть утворювати дифузійні шари з переважною більшістю хімічних елементів Періодичної системи елементів.

При реалізації будь-якого процесу ХТО вироби витримують певний час при температурі насичення в оточенні середовища, що насичує. Середовища, що насичують, можуть бути твердими, рідкими або газоподібними.

Під час використання високотемпературної цементации йде підвищення температури (до 1000-1050°C), яке є ефективним засобом інтенсифікації процесу цементации. З підвищенням температури цементации збільшується швидкість дифузії вуглецю в аустеніті й значно зростає товщина шару при однаковій витримці, вуглець розподіляється по глибині шару більш рівномірно, а товщина евтектоїдної зони збільшується.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА СПОСОБУ ХТО ДЛЯ ВТОРИННОГО ТВЕРДІННЯ ПОВЕРХНІ ВИРОБІВ

2.1 Обґрунтування матеріалу дослідження

На підставі проведеного аналізу було обрано найбільш ефективний метод для отримання високої твердості цементованого шару поверхні сталі - високотемпературна цементация на вторинне твердіння та наступний відпуск. У порівнянні зі звичайною цементациєю час процесу скорочується на 40-50%. Газова цементация при 1000°C скорочує час процесу в 2 рази, а при 1050°C - в 3 рази в порівнянні із цементациєю при 930°C. Для високотемпературної цементации, враховуючи високу температуру нагрівання (1050-1100°C), застосовують безмуфельні печі зі спеціальними нагрівачами й футеровкою.

У результаті хіміко-термічної обробки змінюються хімічний і фазовий склад, структура й властивості поверхневих шарів матеріалу. Зміна хімічного складу обумовлює зміну структури й властивостей дифузійного шару.

Товщина дифузійного шару, його фазовий склад і властивості (твердість, пластичність, зносостійкість і ін.) визначають ступінь підвищення стійкості деталей при експлуатації в результаті їхньої хіміко-термічної обробки в тому або іншому середовищі при обраних параметрах процесу. Причому результати досліджень показують, що одночасне комплексне насичення декількома компонентами більш ефективно, ніж однокомпонентне [33].

Метою даної роботи є дослідження впливу нових методів хіміко-термічної обробки, що сполучаються із загартуванням або відпуском, без використання спеціального обладнання, на ефективність експлуатації деталей у виробничих умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- встановити вплив технологічних параметрів хіміко-термічної обробки сталі на мікроструктуру, фазовий склад і властивості поверхневих шарів цементованої сталі;
- дослідити вплив зміцненого поверхневого шару вторинно твердіючої цементованої сталі 09Х3МЗНФБч на збільшення стійкості.

2.2 Матеріали та обладнання для ХТО на вторинне твердіння

Закономірності вторинного твердіння високолегованих залізних сплавів досліджували на прикладі сталі 09Х3НМЗФБч. Характеристики сталі та її механічні властивості наведено у таблицях 2.1, 2.2

Травлення зразків проводили у 4% розчині азотної кислоти. Металографічне дослідження проводили на мікроскопі МИМ-8М.

Таблиця 2.1- Характеристики сталі 09Х3НМЗФБч

Номер плавки	758					
Марка сталі	09Х3НМЗФБч					
Профіль,мм	ø150					
Довжина,мм	н.к. 1000					
Стан поставки	ков.					
Кількість	шт.	3				
	кг	174				
Вміст легувальних елементів, мас. %	С	Si	Mn	S	P	Ni
	0.12	0.25	0.60	0.006	0.016	1.45
	Cr	Ti	Al	V	Mo	Nb
	2.87	0.01	0.032	0.30	3.00	0.30

Електрономікроскопічні дослідження проводили на мікроскопі РЕМ-106И, оснащеному системою рентгеноспектрального мікроаналізу при прискорювальній напрузі від 20 до 30 кВ та силі струму зонда від 4мА до 30мА у вторинних і відбитих електронах з діаметром зонду від 1000 до 2000 нм при збільшенні $\times 1000-5000$.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сталі 09ХЗНМЗФБч

Номер плавки	758					
Напрямок	повздовжний			поперечний		
Часовий опір σ_b Н/мм ² 20°C	1198			1198		
Межа плинності $\sigma_{0.2}$ МПа	1162			1162		
Відносне видовження, % 20°C	16			16		
Відносне звуження, % 20°C	64			51		
Ударна в'язкість, Дж/см ² 20°C	24			19,6		
Макроструктура	Задов.			Задов.		
Неметалічні включення	ОС	ОТ	СХ	СП	СН	С
	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0
нітриди	1.0					
Термо-обробка	Заг. 1030 °С, олія Відп. 530 °С 3 рази по 1 год.					
Продукція відповідає	ТУ У27.1-00186536-0005:2016					

2.3 Виготовлення об'єктів для мікроструктур

Мікроаналізу піддають мікрошліфи після підготовки. Зразки закріплюють в спеціальних затисках (струбцини). Поверхню зразка роблять плоскою і шліфують вручну, або на верстатах спеціальними абразивними шкірками. При цьому дотримується послідовність і плавність переходу від грубозернистих до дрібнозернистих шкірок. Потім для видалення дрібних рисок зразки полірують.

Механічне полірування здійснюється на полірувальному верстаті, диск якого обтягнуто фетром. На тканину наноситься паста. Коли поверхня стає дзеркально блискучою, полірування припиняється. На відполірованому мікрошліфі при спостереженні під мікроскопом мають бути відсутні подряпини. Потім мікрошліфи промивають водою й просушують фільтрувальним папером.

Після цього шліфи зазнають травлення, яке проводять зануренням шліфу у відповідний реактив. Для виявлення дифузійного шару травлення мікрошліфів проводиться у 4% розчині азотної кислоти. Після промивання і сушіння мікрошліфи вивчали за допомогою металографічного мікроскопа. Товщину й структуру дифузійних шарів досліджували на мікроскопах МИМ–8М.

Для оцінки фізико-механічних властивостей покриттів використовували метод вимірювання твердості. Мікротвердість поверхневого шару вимірювали на приладі ПТМ–3. Алмазна піраміда вдавлюється на певне місце, знайдене на шліфі при збільшенні, під навантаженням 0,98 н і потім вимірюється діагональ відбитка, по величині якої судять про твердість.

2.4 Методика рентгеноструктурного аналізу

Рентгеноструктурний аналіз є одним із основних методів визначення структури кристалів.

Методами рентгеноструктурного аналізу вивчають метали, сплави, мінерали, неорганічні й органічні сполуки, полімери, аморфні матеріали, рідини й гази, молекули білків, нуклеїнових кислот і т.д.

Метою рентгеноструктурного аналізу є встановлення відповідності між атомною структурою досліджуваного зразку й просторовим розподілом рентгенівського випромінювання.

При цьому вирішення прямого завдання - визначення дифракційної картини за відомим розташуванням атомів у зразку - є хоча й складною, але вирішуваною проблемою, тоді як зворотня задача - встановлення розташування атомів в об'єкті, що розсіює, за розподілом дифрагиваної інтенсивності - натрапляє на обмеження фундаментального характеру. Увесь розвиток рентгеноструктурного аналізу пов'язаний зі спробами обійти ці фундаментальні обмеження, спробами цілком успішними, про що свідчить безліч розшифрованих структур. Розроблено різні методи й підходи до розв'язку завдань структурного аналізу, допуски й спрощення, які дозволяють сформулювати початкове наближення й далі послідовно уточнювати структуру. Крім того, дослідження взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною дає можливість оцінити не тільки структурні характеристики зразка, але й деякі субструктурні параметри [34].

Рентгенодифракційний аналіз є одним з найбільш потужних методів кількісного і якісного аналізу кристалічних фаз. Визначення зв'язку між особливостями атомної структури й властивостями речовини дозволяє встановлювати раціональний контроль над технологічними процесами, розкривати причини зміни цих властивостей під дією того або іншого фактора, дає можливість обґрунтовано управляти технологічними процесами й змінювати їх у потрібному напрямку [35].

РОЗДІЛ 3. СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВТОРИННО ТВЕРДЮЧОЇ ЦЕМЕНТОВАНОЇ СТАЛІ 09Х3МЗНФБч

3.1 Дослідження мікроструктури зразків сталі після ХТО

Металографічний аналіз проводили на зразках поковки $\varnothing 150$ після випробування на ударну в'язкість. Зразки Е80П і Е80Пр виготовляли з ударних зразків поковки $\varnothing 150$, які були термічно оброблені відповідно до ТУ У 27.1-00186536-005.2016. Хордові зразки 1-1, 2-2, 3-1 були виготовлені із виливка, який попередньо був перекований на переріз $\varnothing 150$ із $\varnothing 430$ за відповідною схемою і наступною термічною обробкою. Термічну обробку зразків 1-1, 2-2, 3-1 проводили за трьома варіантами (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Варіанти термічної обробки зразків сталі 09Х3МЗНФБч

Варіант	№ зразка	Режими термообробки	КСУ МДж/м ²
1	1-1	Загартування 1010°C , 1 год, олія; відпуск 520°C, 1 год 30 хв х2, повітря; холод (-70°C), 1 год...1 год 30 хв; відпуск 520°C, 1 год 30 хв	0,0105
2	2-2	Загартування 1030°C , 1 год, олія; відпуск 530°C, 1 год 30 хв х2, повітря; холод (-70°C), 1 год...1 год 30 хв; відпуск 530°C, 1 год 30 хв	0,012
3	3-1	Загартування 1030 , 1 год, олія; відпуск 530°C, 1 год 30 хв. ×2, вода; холод (-70°C), 1 год...1 год 30 хв; відпуск 530°C, 1 год 30 хв, вода	0,01
4	Норми ТУ У 27.1– 00186536-005.2016, не менше	Загартування 1030°C ± 10°C, олія Відпуск 530°C ± 5°C (×3...5)	0,018

Для визначення хімічного складу неметалічних та металічних включень використовували растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И. Спектральний аналіз проводили по приграничним зонам зерен та неметалічним включенням на межах зерен. В результаті досліджень виявлено граничні ліквати у вигляді відокремлених ділянок ніобію (рис. 3.1, 3.2).

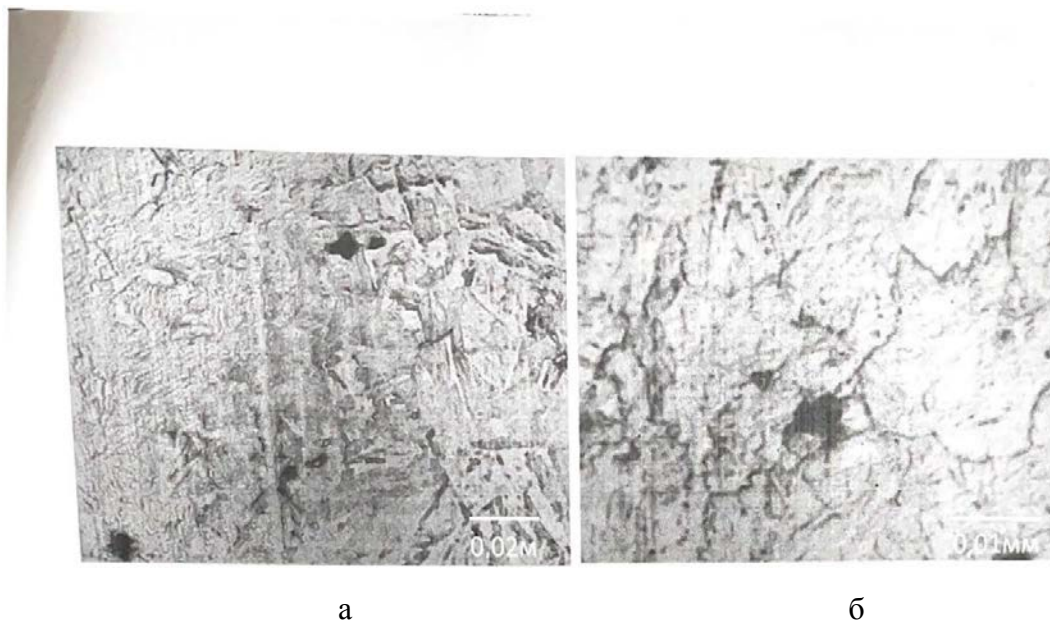


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сталі 09X3NM3ФБч після термічної обробки
а-зразок Е80П, збільшення $\times 600$ б -зразок Е80Пр, збільшення $\times 1600$

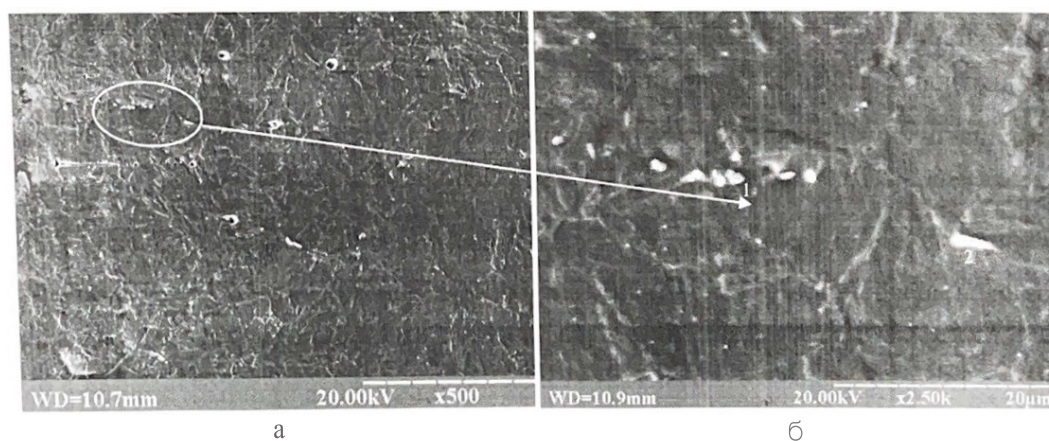


Рисунок 3.2 - ліквація ніобію по межах зерна сталі 09X3NM3ФБч
а-зразок Е80Пр, збільшення $\times 500$ б -зразок Е80Пр, збільшення $\times 2500$

За допомогою спектрального аналізу підтверджено склад ліквацийних виділень (рис. 3.3)

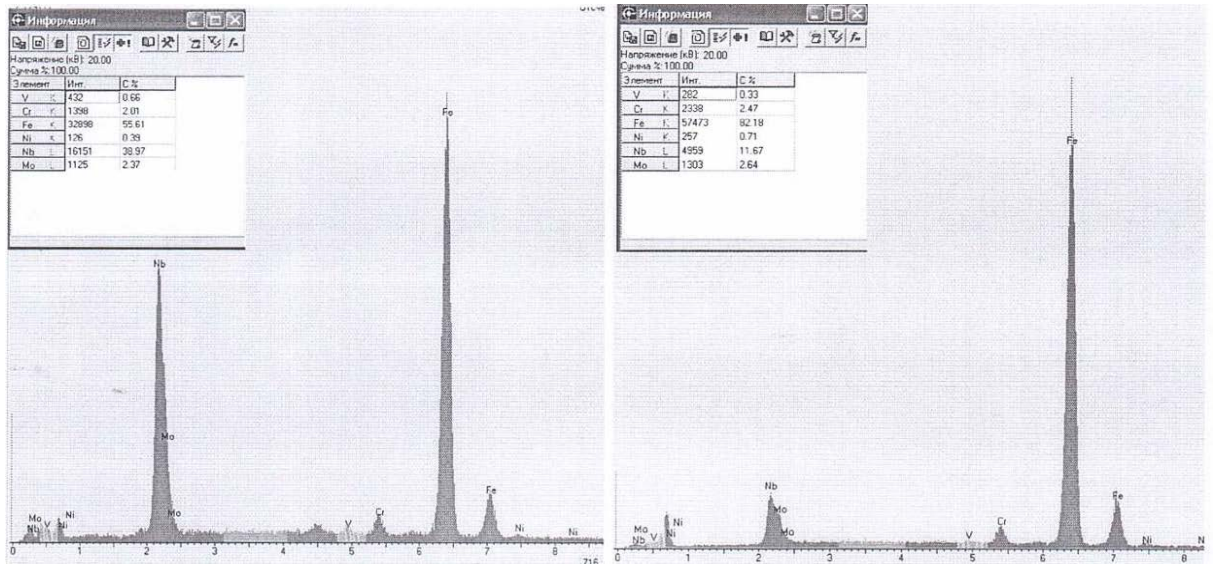
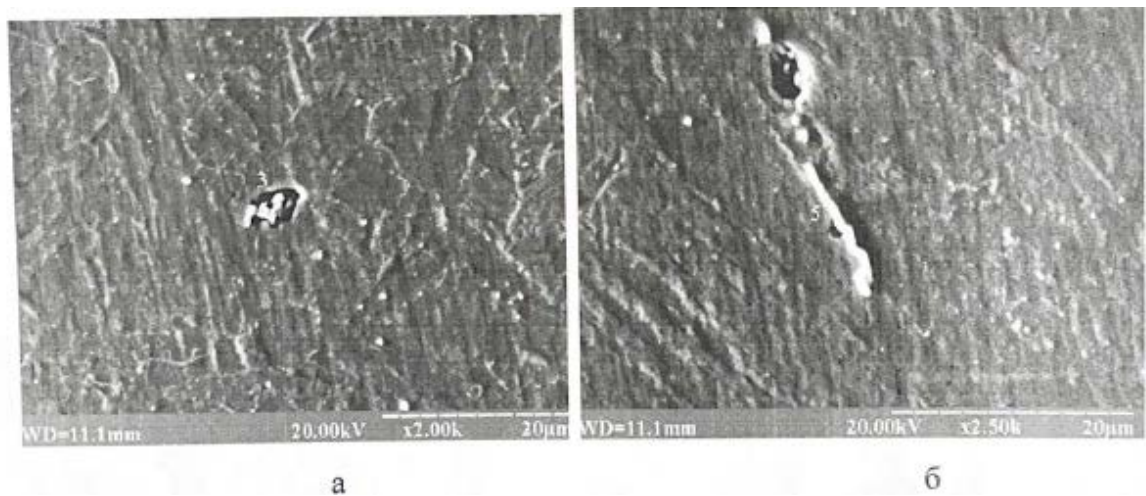


Рисунок 3.3 – Рентгеноспектральні дослідження зразка E80Pr

а – ліквация в точці 1

б - ліквация в точці 2

Виявлено також, що ліквацийні ділянки Nb окреслюють сульфіди титану різної морфології. Встановлено наявність евтектичних сульфідів титану, які мають темне забарвлення (рис. 3.4) і відповідний хімічний склад (рис. 3.5).



а

б

Рисунок 3.4 – Сульфіди титану з ліквацийними включеннями ніобію

а-зразок E80Pr, збільшення $\times 2000$ б -зразок E80Pr, збільшення $\times 2500$

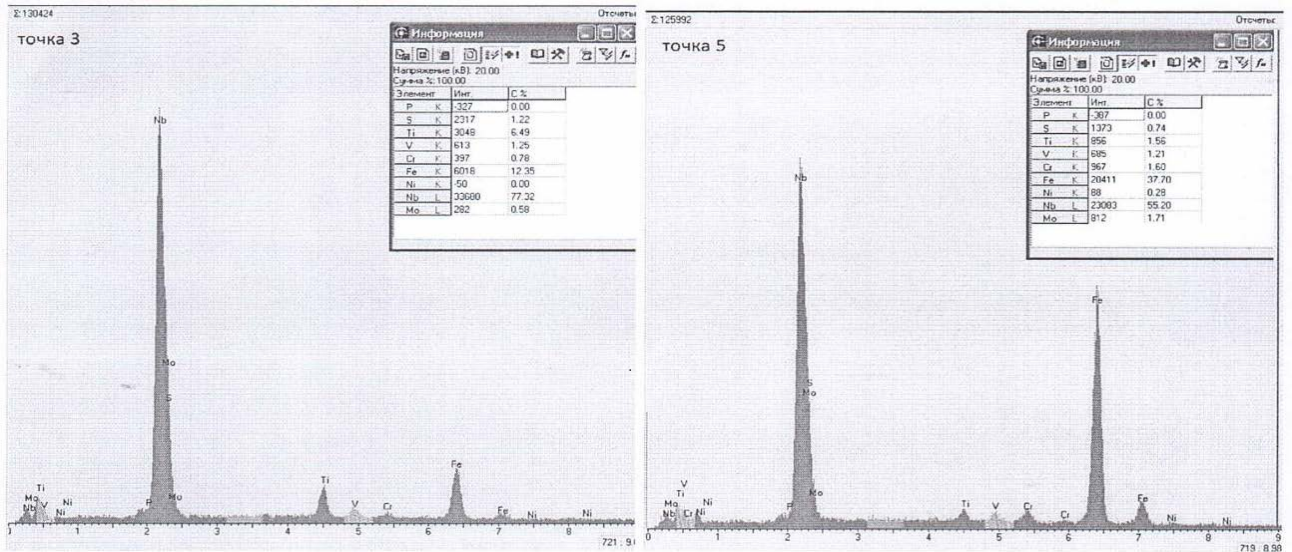
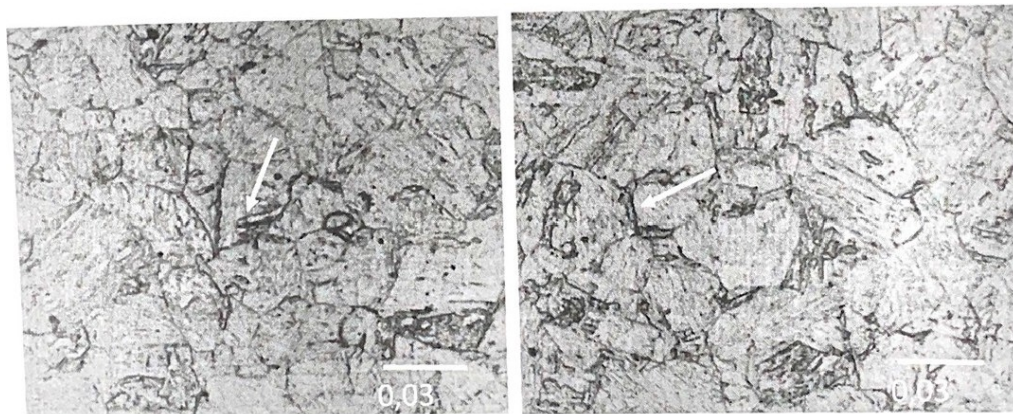


Рисунок 3.5 - Рентгеноспектральні дослідження характерних точок 3 та 5.

а – ліквіація в точці 3

б - ліквіація в точці 5

Металографічним дослідженням зразків 1-1, 2-2, 3-1 встановили, що повторна гаряча деформація в інтервалі температур 1000-850°C з наступною нормалізацією сприяла частковому подрібненню зерен (розмір зерен зменшився від 5 до 8 балів) та суттєво не змінила топографії ліквіаційних ділянок (рис. 3.6).



а

б

Рисунок 3.6 - Мікроструктура сталі 09ХЗНМЗФБч після повторної гарячої деформації, збільшення $\times 1000$

а-зразок Е80П

б -зразок Е80Пр

3.2 Випробування механічних властивостей поверхневого шару після ХТО

Дослідження фрагменту поковки, виготовленого в «УкрНДІСпецсталь» із сталі 09ХЗНМЗФБч та після перековки у цеху 2, провели за дослідним режимом деформації з вихідного перерізу Ø150мм на той самий сортамент - Ø150мм, з наступною нормалізацією в цеху 3 (ПрАТ «Мотор Січ»).

Роботу проводили з метою усунення крупнокристалічної структури та підвищення механічних властивостей (збільшення пластичності) у заготовках з нової сталі 09ХЗНМЗФБч, призначеної для виготовлення шестерень 6281100066-6004/6005 та ін. Режими обробки прутка представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вплив гарячої деформації сталі 09ХЗНМЗФБч на її структуру і ударну в'язкість.

Сталь 09ХЗНМЗФБч	Режим деформації у цеху 2	Режим нормалізації цеху 3 після перековки
Перекування вихідного перерізу Ø150 на той же сортамент Ø150	<ul style="list-style-type: none"> - Деформацію заготовки проводили методом протяжки; осадку у вихідний розмір зі зміною напрямку протяжки на 90° за схемою кування заготовок із швидкорізальних сталей. - Гранична температура нагріву 1000°C, температура кінця обробки не нижче 850°C. - Допустимий ступінь деформації на одне нагрівання - 50% вздовж осі, поперек осі - 25%, охолодження на повітрі. 	980 °С–650°С, повітря

За результатами дослідження макроструктура перекованого прутка, оцінена за ГОСТ 10215-75, задовільна, характеризується рівномірним матовим відтінком протруєної поверхні, метал щільний, центральна пористість, точкова неоднорідність, ліквідаційних включень не виявлено, що відповідає вимогам ТУ3203 (рис.3.7).



Рисунок 3.7 – Структура перекованого прутка

Механічні властивості випробовували на зразках, термооброблених за трьома дослідними режимами, а також за стандартним режимом, рекомендованим у ТУ У 27.1-00186536-005.2016. Термічну обробку зразків проводили у заготовках перетином 20×20. Зразки, термооброблені за трьома режимами (режими №№1,2,3), вирізали в хордовому напрямку.

Зразки, термооброблені за стандартним режимом (режим №4), вирізали в поперечному напрямку згідно зі схемами, представленими на рис. 3.8.

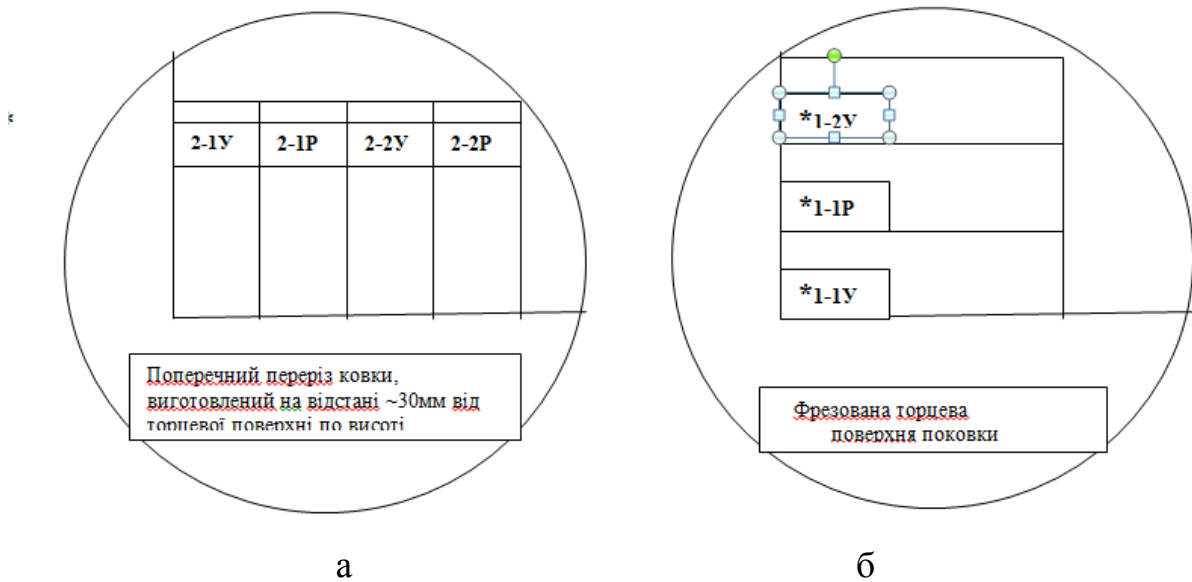


Рисунок 3.8 - Схема вирізки зразків

а – схема 1

б – схема 2

Режими термічної обробки зразків та результати випробування механічних властивостей представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Варіанти термічної обробки зразків із сталі 09Х3МН3ФБч для визначення механічних властивостей

№ варіанту т/о	№ зразка	Режими термообробки	Механічні властивості				
			σ_b , Н/мм ²	δ , %	Ψ , %	KCU, МДж/м ²	НВ, d отп. (HRC)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1-1 1-2	Загартування 1010°C, 1 год, олія; відпуск 520°C, 1 год 30 хв ×2, повітря; холод (-70°C), 1 год...1 год 30 хв; відпуск 520°C, 1 год 30 хв.	1164	16	59	0,1225	3,25 (37)
			1174	16,8	61,7	0,08	3,20 (37)
2	2-1 2-2	Загартування 1030°C, 1 год, олія; відпуск 530°C, 1 год 30 хв ×2, повітря; холод (-70°C), 1 год...1 год 30 хв; відпуск 530°C, 1 год 30 хв.	1167	16,4	60,2	0,1352	3,25 (37)
			1164	19,2	64,1	0,0981	3,20 (37)

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
3	3-1	Загартування 1030°C, 1 год, олія;	1174	15,2	69	0,0862	3,20 (37,5)
	3-2	відпуск 530°C, 1 год 30 хв х2, вода; холод (-70°C), 1 год...1 год 30 хв; відпуск 530°C, 1 год 30 хв, вода	1178	18,0	63,4	0,111	3,20 (37,5)
4	*1-1	Загартування 1030°C, 1 год, олія, відпуск 530°C, 1 год ×3, повітря	1178	18	68,5	0,18	3,25 (37)
	*1-2		--	-	-	0,20	3,25 (37)
	*2-1		1174	17,6	66,4	0,18	3,25 (37)
	*2-2		1174	18,0	66,3	0,17	3,25 (37)
Норми ТУ У 27.1- 00186536- 005.2016, не менш ніж		Загартування 1030°C ± 10°C, олія Відпуск 530°C ± 5°C (×3...5)	1200	10	30	0,70	не нормовано

Примітка. Норми за ТУ У 27.1-00186536-005.2016 передбачено для поздовжніх та поперечних зразків.

На рисунках 3.9 і 3.10 представлено графічне зображення процесів цементації сталі ДИ-3А та сталі ВКС-5, які є аналогами сталі 09Х3МНЗФБч.

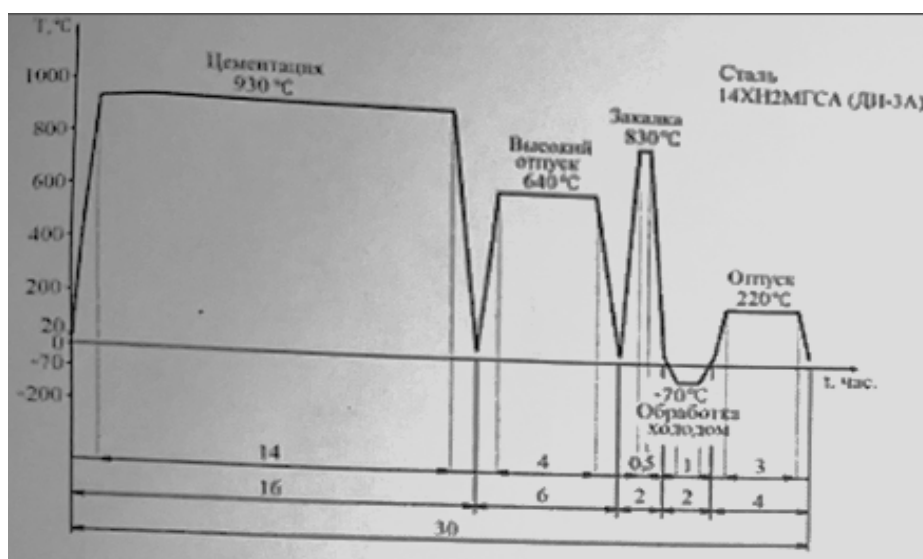


Рисунок 3.9 – Залежність часу цементації сталі ДИ-3А від температури

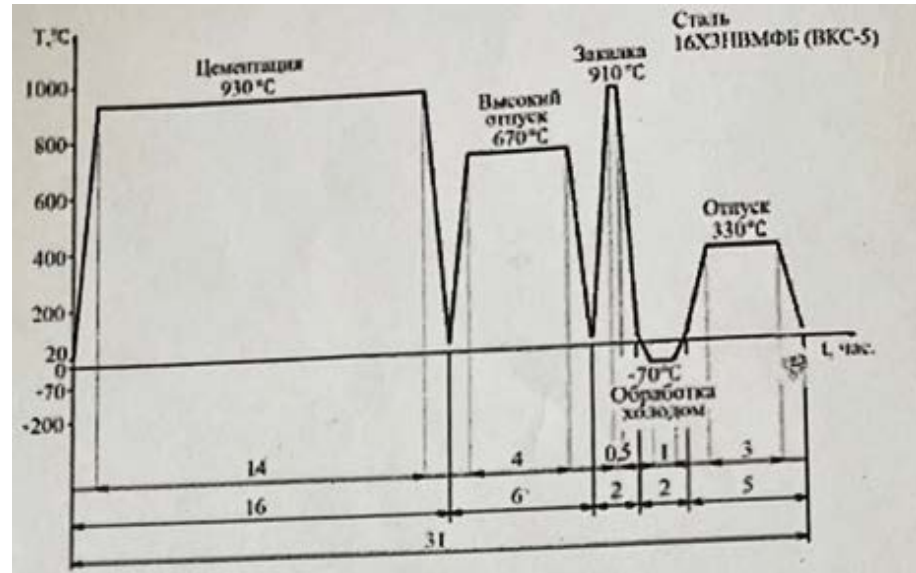


Рисунок 3.10 – Залежність часу цементації сталі ВКС-5 від температури

На основі цих графіків ми можемо стверджувати, що при 1030 °C час цементації сталі 09ХЗНМЗФБЧ, скоротився в 2 рази порівняно з її аналогами (рис. 3.11)

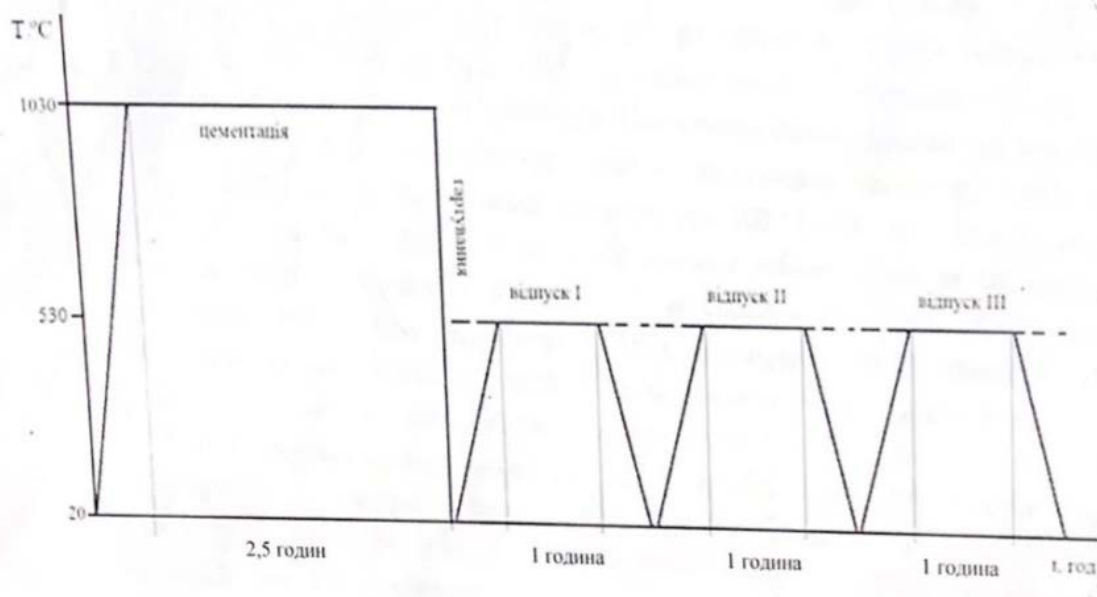


Рисунок 3.11 – Залежність часу цементації сталі 09ХЗНМЗФБЧ від температури

На рисунках 3.12 – 3.16 представлено фото зламів на фрагментах зруйнованих ударних цементованих зразків сталі 09Х3МНЗФБч.

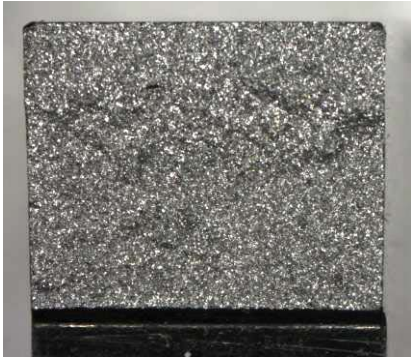


Рисунок 3.12 - Зразок 1-1

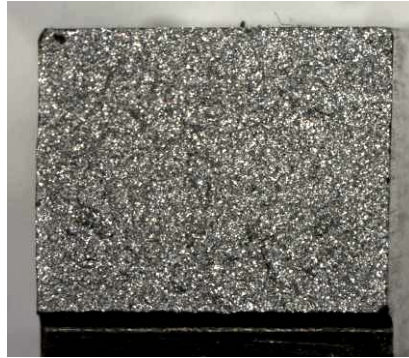


Рисунок 3.13 - Зразок 2-1



Рисунок 3.14 - Зразок 3-1



Рисунок 3.15 - Зразок *1-1



Рисунок 3.16 - Зразок *2-1

Висновки за розділом 3

Методом рентгеноспектрального аналізу структурно-фазового складу сталі 09Х3МНЗФБч виявлено зональну ліквідацію ніобію та забруднення металу евтектичними сульфідами типу $TiS - Ti_2S$ складної морфології, що призвело до зниження показників ударної в'язкості та межі міцності. Можна стверджувати,

що вищевказані недоліки структурного стану сталі виникли внаслідок порушення технології виготовлення сталі. Важливо зазначити, що сульфід титану, які розташовані в своїй більшості на межах зерен, мають різну морфологію і окреслюють ліквацийні ділянки ніобію.

Провели механічні випробування сталі після хімікотермічної обробки. Отримані результати випробування показали, що сталь мала дещо занижені показники межі міцності та ударної в'язкості, відносне подовження та відносне звуження відповідали вимогам ТУ.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ СТАЛІ 09Х3МНЗФБч

Необхідність застосування теплостійких сталей для шестерень і підшипників авіаційних двигунів обумовлено, з одного боку, високими температурами в зоні контакту деталей, а також повітряно-олійним середовищем у робочій зоні, з іншого боку, вимогами збереження протягом тривалого часу працездатності деталі у разі аварійного знемаслення. В даний час з цією метою використовуються азотована сталь 30Х2Н2ВФМА-Ш і цементована сталь 16ХНЗВФМБ (ВКС-5) з теплостійкістю відповідно 450°С і 250°С. Недоліками зазначених сталей є обмеження по глибині зміцнення сталі 30Х2Н2ВФМА-Ш до 0,5...0,7 мм, а також недостатня теплостійкість сталі ВКС-5, що не дозволяє повною мірою використовувати переваги дуплексної хіміко-термічної обробки (цементация плюс азотування).

Додатковими факторами, що знижують контактну витривалість деталей, є абразивне зношування поверхонь і адгезія при терті. Вплив зазначених факторів знижується зі збільшенням поверхонь твердості.

Попередні випробування в лабораторії контактної витривалості показали ряд переваг механічних і експлуатаційних властивостей сталі 09Х3МНЗФБч у порівнянні з аналогічними сталями ДІ-3А та ВКС-5.

Середня контактна стійкість виросла до 5 разів (рис. 4.1). Крім цього, підвищилася технологічність при механічній обробці зразків.

Контактна витривалість у сталі 09Х3МНЗФБч у п'ять разів вища ніж у сталі ВКС-5. Розроблено режими хіміко-термічної обробки, які дозволяють збільшити теплостійкість сталі до 450°С.

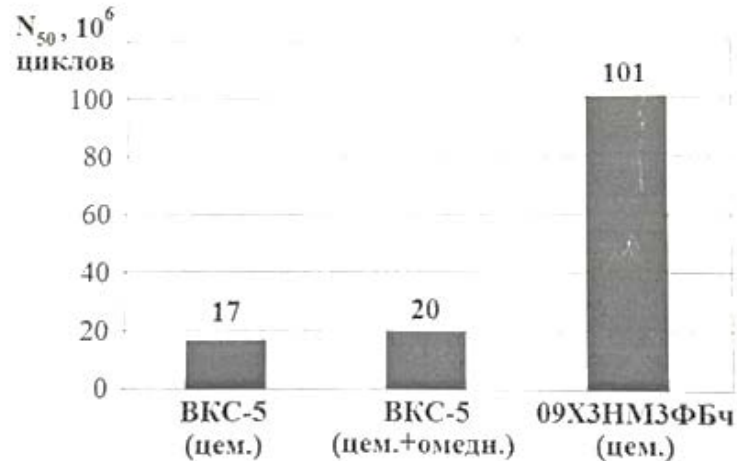


Рисунок 4.1 – Діаграма середньої контактної витривалості сталей 09Х3НМ3ФБч та ВКС-5

Висновки за розділом 4

Наведені результати досліджень вказують на те, що випробування в лабораторії контактної витривалості показали ряд переваг механічних і експлуатаційних властивостей сталі 09Х3МН3ФБч у порівнянні з аналогічними сталями ДІ-3А та ВКС-5.

Середня контактна витривалість виросла до 5 раз (рис. 4.1). Також підвищилася технологічність при механічній обробці зразків.

Контактна витривалість сталі 09Х3МН3ФБч у п'ять разів вища, ніж у сталі ВКС-5. Розроблено режими хіміко-термічної обробки, які дозволяють збільшити теплостійкість сталі до 450°C і зменшити тривалість хіміко-термічної обробки.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного літературного аналізу було розглянуто різні види хіміко-термічної обробки авіаційних сталей. Був обраний раціональний режим ХТО досліджуваної сталі 09Х3МНЗФБч для отримання високої твердості цементованого шару поверхні сталі - високотемпературна цементация на вторинне твердіння та наступний відпуск. У порівнянні зі звичайною цементациєю час процесу скорочується на 40-50%.

Після проведення обраного режиму ХТО у зразках сталі металографічно виявили ліквацийні включення та за допомогою рентгеноструктурного аналізу встановили хімічний склад лікватів. Сульфіди титану, які розташовані в своїй більшості на межах зерен, мають різну морфологію і окреслюють ліквацийні ділянки ніобію.

Провели механічні випробування сталі після хімікотермічної обробки. Отримані результати випробування показали, що сталь мала дещо занижені показники межі міцності та ударної в'язкості, відносно подовження та відносно звуження відповідали вимогам ТУ. Випробування на контактну витривалість продемонстрували, що витривалість сталі 09Х3МНЗФБч у п'ять разів перевищує відповідні показники сталі ВКС-5. Розроблені режими ХТО дозволили збільшити теплостійкість сталі до 450°C та зменшити тривалість процесу хіміко-термічної обробки.

Список використаних джерел

1. Вплив деформації та термічної обробки на структуру та властивості матеріалів, частина II (Основи термічної обробки сталі): методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2014. 36 с.
2. Губенко С. И., Бачурин А. П., Мовчан А. В. Применение химико-термической обработки с целью повышения стойкости литого режущего инструмента. Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка». № 14. Т. 2. 2010. С. 36-40.
3. Лазечный И. Н., Банас И. П. Формирование при ХТО структуры и свойств цементуемых сталей различной теплостойкости. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2005. № 1. С. 37–44.
4. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Альянс, 2015. 447 с.
5. Мищенко В.Г., Меняйло А.И. Управление параметрами диффузионного слоя в процессе химико-термической обработки стали. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения*. 2015. С.1-7.
6. Міщенко В. Г., Меняйло О. І., Багрійчук О. С. Дослідження структури та властивостей вториннотвердіючих цементованих сталей. *Матеріалознавство і термічна обробка металів*. 2013. № 2-3. С. 48–53.
7. Мартиненко В. В., Міщенко В. Г. Випробування контактної витривалості цементованих сталей для зубчастих коліс та шарикопідшипників. *Зб. наук. пр. студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2016»* у 4 т. Запоріжжя: Запоріз. нац. ун-т, 2016. Т. 1. С. 356–358.

8. Журавлев В. Машиностроительные стали: справочник, изд. 3-е, перераб. и доп / В.Н. Журавлев, О.И. Николаева. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.
9. Гольдштейн М.Н., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: Уч-к для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. М.: «МИСИС», 1999. 408 с.
10. Вивчення структури, властивостей та призначення конструкційних легованих сталей загального застосування: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, В.І. Овчаренко. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. 31 с.
11. Пат. 94552 Україна, МПК C23C8/00, G01N13/00, G01B5/02, G01B21/02. Спосіб визначення параметрів дифузійного шару при хіміко-термічній обробці / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. № а201007915 ; заявл. 24.06.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.
12. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. М.: Металлургия, 1981. 648 с.
13. Mingjia Wang, Effect of nitrogen on the austenite cooling transformation kinetics of a high-speed steel / Mingjia Wang, Yan Wang, Yuchun Xing, Lei Chen // Materials Science and Engineering: A –2006. –Vol. 438 –440. P. 1143 –1145.
14. Ануфриев И.С. Справочник конструктора-машиностроителя: справ. изд. / Под ред. И.Н. Жестковой. В 3т. Т.1. 8-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
15. Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
16. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: Уч-к для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова. 8-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.

17. Daniel Tobała Improvement of wear resistance of some cold working tool steels / Daniel Tobała, Witold Brostow, Kazimierz Czechowski, Piotr Rusek // *Wear*. – 2017. – Vol. 382 –383. P. 29 –39.
18. Derzija Begic-Hajdarevic Experimental Study on the High Speed Machining of Hardened Steel / Derzija Begic-Hajdarevic, Ahmet Cekic, Malik Kuleno-vic // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 69. P. 291 –295.
19. Вплив деформації та термічної обробки на структуру та властивості матеріалів, частина I (Вплив пластичної деформації на властивості металів і полімерних матеріалів): методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2013. 27 с.
20. Parameters control of 09Cr3NiMo3VNbr carburizing steel diffusion layer in the process of thermochemical treatment / V. G. Mishchenko, O. I. Meniailo, O. S. Bagriichuk, O. I. Bulakh // *Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2016 (MS&T'16) (23–27 October 2016)*. – Salt Lake City, United States, 2016. – Vol. 2. – P. 159–166. V. Yu. Skeebe Numerical Simulation of Temperature Field in Steel under Action of Electron Beam Heating Source / V. Yu. Skeebe, V. V. Ivancivsky, N. V. Martyushev, D. V. Lobanov, N. V. Vakhrushev, A. K. Zhigulev // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111.
21. Геллер Ю.А. Инструментальные стали: Монография. 4-е изд. М.: Металлургия, 1975. 584 с.
22. Бялік О.М. Черненко В.С., Писаренко В.М., Москаленко Ю.Н. Металознавство: підручник. 2-ге вид. перероб. і доп. К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2008. 384 с.
23. Вивчення структури, властивостей та призначення спеціальних сталей і сплавів хімічного машинобудування: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання

- лабораторного практикуму для студентів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, В.І. Овчаренко. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. 40 с.
24. Гуляев А.П. *Металловедение: Уч-к для вузов* / А.П. Гуляев. 6-е изд., перераб. и доп. М.: *Металлургия*, 1986. 544 с.
25. Гарнец В.М. *Материалознаводство: підручник*. К.: *Кондор*, 2009. 386 с.
26. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. *Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи: учебн. пособие*. 5-е изд. перераб. и доп. М.: *Металлургия*, 1984. 384 с.
27. Гуляев А. П. *Металловедение: учебник для вузов* 7-е изд., перер. и доп. Москва: *Альянс*, 2012. 644 с.
28. Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізовуглецевих сплавів: методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму для студентів I–III курсів усіх форм навчання / В.В. Трофименко, О.П. Клименко, В.І. Овчаренко. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2014. 46 с.
29. Солнцев Ю.П. *Спеціальні конструкційні матеріали: підручник для вищих навчальних закладів* / Ю.П. Солнцев, С.Б. Беліков, І.П. Волчок, С.П. Шейко. Запоріжжя: «ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ», 2010. 536 с.
30. A.F. Rousseau Carbon evolution during vacuum heat treatment of High Speed Steel / A. F. Rousseau, J. G. Partridge, Y. M. Gözükar, S. Gulizia, D. G. McCulloch// *Vacuum* –2016. –Vol. 124. P. 85 –88.
31. Mingjia Wang Sun semi-high speed steel containing nitrogen/ Mingjia Wang, Yan Wang // *Materials Science and Engineering: A* –2006. –Vol. 438 –440. P. 1139 – 1142.
32. Zhecheva, A., Malinov, S., Sha, W. Surface gas nitriding of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si alloys. *Z. Metallkd.* –2003. -No 7. –P. 19–24.
33. Черноиваненко Е. А., Губенко С. И., Мовчан А. В., Бачурин А. П. Получение композитной структуры в приповерхностном слое инструмента на базе литой

быстрорежущей стали Р6М5. «Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка». 2011. № 4. Т. 19. С. 188-192.

34. Горелик С. С., Расторгуев А. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронографический анализ металлов. М.: Металлургия, 1963. 218 с.
35. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ : индицирование рентгенограмм (справ. руков.). Москва: Наука, 1981. 796 с.