

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Дослідження впливу термічної обробки на структуру і
властивості високохромистих сталей типу AISI 420 /
Study of the effect of heat treatment on the structure and
properties of highchromium steels of the AISI 420 type**

спеціальність матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма 132 Матеріалознавство

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи _____

Драгонюк Дмитро Вікторович

_____ (підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Зайчук Наталія Петрівна

_____ (підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2025

р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Мельничук Микола Дмитрович

_____ (підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Імбирович Н.Ю.

"09" вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Аврамюк Дмитро Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи "Визначення впливу термічної обробки на структуру і властивості високохромістких сталей типу AISI 420"

керівник роботи Зайчук Наталія Петрівна к.т.н. доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "05" 06 2025 року № 282/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«06» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи марка сталі AISI 420, комплекс механічних властивостей, нормативні документи, базовий технологічний процес ТО, зразки зі сталі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Розділ 1 Корозійна стійкість високохромістких сталей, їх адгезія; Розділ 2 Технологічна частинка; Розділ 3 Термічна частинка; Розділ 4 Вплив ВТМО на структуру сталі AISI 420; Розділ 5 Аналіз результатів досліджень механічних властивостей. Висновки

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

13 сторінок формату А4: 1й сторінок - Об'єкт дослідження; 2й сторінок - деталізовані процеси; 3й сторінок - Мінімальний склад сталі AISI 420 та режим термічної обробки для сталі AISI 420; 4й сторінок - Графік режиму ВТМО; 5й, 6й, 7й сторінки - Мікроструктура сталі AISI 420 після нагрівання; 8й сторінок - Вплив структурного стану на твердість і міцність сталі AISI 420; 9й - 12й сторінки - результати досліджень механічних властивостей; 13й сторінок - Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. Капірань	Мисковець С.В., к.т.н., доцент	02.10.2025	06.12.2025

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Розділ 1	20.10.2025	виконав
2	Розділ 2	15.11.2025	виконав
3	Розділ 3	15.11.2025	виконав
4	Розділ 4	06.12.2025	виконав
5	Розділ 5	06.12.2025	виконав

Здобувач вищої освіти [Redacted Signature]

Керівник кваліфікаційної роботи [Redacted Signature]

АНОТАЦІЯ

Драгонюк Д.В. Дослідження впливу термічної обробки на структуру і властивості високохромистих сталей типу AISI 420. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

В роботі проведено дослідження впливу високотемпературної термомеханічної обробки (ВТМО) високохромистих сталей типу AISI 420 на структурні зміни та формування властивостей. Вивчено структуру сталі AISI 420 до проведення термічної обробки та після. Здійснено порівняльний аналіз структурних змін після класичної термічної обробки та після ВТМО. Встановлено характер зміни властивостей досліджуваної сталі після запропонованої обробки. Обрано режими проведення ВТМО. Здійснено висновки щодо вибору режимів ТО та проведення ВТМО.

Об'єкт дослідження: мартенситна корозійностійка сталь AISI 420.

Предмет дослідження: вплив режимів термічної та високотемпературної термомеханічної обробки на мікроструктуру та комплекс механічних властивостей.

Загальний обсяг роботи: 59 сторінок, вступ, 5 розділів та висновки, 14 рисунків, 7 таблиць, 26 літературних джерел.

Ключові слова: високохромисті сталі, хром, мартенсит, пластична деформація, висотемпературна термомеханічна обробка, режим термічної обробки.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 1825.00.000 ПЗ			
Розробив		Драгонюк			Дослідження впливу термічної обробки на структуру і властивості високохромистих сталей типу AISI 420 / Study of the effect of heat treatment on the structure and properties of highchromium steels of the AISI 420 type	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив		Зайчук					4	59
Н. Контр		Мисковець			ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. Мм-21			
Затв.		Імбірович						

ABSTRACT

Dragonyuk D.V. Study of the effect of heat treatment on the structure and properties of high-chromium steels of the AISI 420 type. Manuscript.

Master's thesis in Materials Science, specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's thesis consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references, and appendices.

The thesis investigates the effect of high-temperature thermomechanical treatment (HTTT) of high-chromium steels of the AISI 420 type on structural changes and property formation. The structure of AISI 420 steel before and after heat treatment was studied. A comparative analysis of structural changes after classical heat treatment and after HTTT was performed. The nature of the change in the properties of the studied steel after the proposed treatment was established. HTTT modes were selected. Conclusions were made regarding the selection of heat treatment modes and the implementation of HTTT.

Object of study: martensitic corrosion-resistant steel AISI 420.

Subject of study: the influence of heat treatment and high-temperature thermomechanical treatment modes on the microstructure and complex of mechanical properties.

Total volume of work: 59 pages, introduction, 5 chapters and conclusions, 14 figures, 7 tables, 26 references.

Keywords: high-chromium steels, chromium, martensite, plastic deformation, high-temperature thermomechanical treatment, heat treatment mode.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 КОРОЗІЙНОСТІЙКІ ВИСОКОХРОМИСТІ СТАЛІ, ЇХ ОСОБЛИВОСТІ	10
1.1. Призначення і класифікація корозійностійких високохромистих сталей.....	10
1.2. Роль хрому та інших легувальних елементів у формуванні корозійної стійкості	14
1.3. Структурні особливості	16
1.4. Особливості термічної обробки залежно від класу сталей	19
1.5. Проблеми експлуатації та механізми деградації	21
1.6. Висновки та постановка завдання	24
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	27
2.1. Термічна обробка високохромистої сталі AISI 420	27
2.2. Вплив термічної обробки на формування властивостей	30
2.3. Технологія високотемпературної термомеханічної обробки	34
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	38
3.1. Характеристика об'єкту дослідження	38
3.2. Методика досліджень мікроструктури та властивостей	40
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ВТМО НА СТРУКТУРУ СТАЛІ AISI 420.....	42
4.1. Мікроструктура сталі AISI 420	42
4.2. Аналіз структурних змін після ВТМО	43
РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	47
5.1. Вплив ВТМО на твердість сталі AISI 420 після ВТМО.....	47
5.2. Аналіз ударної в'язкості сталі	50
5.3. Формування міцнісних характеристик сталі AISI 420	53
ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Корозійностійкі високохромисті сталі займають особливе місце серед конструкційних матеріалів сучасного машинобудування, оскільки поєднують здатність працювати в агресивних середовищах із достатнім рівнем міцності, зносостійкості та довговічності. Розвиток енергетики, хімічної та харчової промисловості, медичного приладобудування, а також авіаційної й транспортної техніки зумовлює постійне зростання вимог до матеріалів, які мають одночасно витримувати механічні навантаження, контакт із корозійно-активними середовищами та дію змінних температур. У цих умовах саме високохромисті корозійностійкі сталі розглядаються як базова матеріалознавча платформа для створення надійних і технологічних деталей відповідального призначення.

Актуальність вивчення даної групи сталей визначається не лише їх широким застосуванням, але й складністю взаємозв'язків між хімічним складом, структурним станом, технологією виготовлення та експлуатаційними властивостями. На відміну від вуглецевих і низьколегованих сталей, для яких головним чинником керування властивостями часто є лише режим термічної обробки, у корозійностійких сталях вирішальну роль відіграє також корозійна поведінка, що безпосередньо пов'язана зі структурними перетвореннями на мікрорівні. Саме тому дослідження структурної чутливості високохромистих сталей до термічних впливів є важливим як з наукової, так і з прикладної точки зору.

Особливий інтерес у цьому контексті становлять мартенситні корозійностійкі сталі, до яких належить сталь типу AISI 420. Вона широко використовується для виготовлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування та помірно агресивних середовищ: ріжучого та хірургічного інструменту, елементів насосів, клапанів, лопаток допоміжних агрегатів, штоків і прецизійних деталей машин. Вибір цієї сталі зумовлений можливістю отримання високої твердості та міцності за рахунок мартенситної

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структури при збереженні базової корозійної стійкості, обумовленої підвищеним вмістом хрому.

Разом з тим саме сталь AISI 420 є яскравим прикладом матеріалу, властивості якого критично залежать від режимів термічної обробки. Термічна обробка в даному випадку виконує подвійну функцію: з одного боку, вона забезпечує формування мартенситної структури та необхідного рівня твердості й зносостійкості, а з іншого – визначає корозійну поведінку матеріалу через перерозподіл хрому між матрицею та карбідними фазами. Неправильно підібрані режими гартування або відпуску можуть призвести до надмірного виділення карбідів хрому, локального збіднення матриці цим елементом і, як наслідок, до зниження корозійної стійкості, особливо щодо пітингової та міжкристалітної корозії.

Таким чином, роль термічної обробки для сталі AISI 420 не зводиться лише до досягнення заданих механічних характеристик. Вона є ключовим інструментом керування мікроструктурою, фазовим складом і стабільністю пасивного стану поверхні. Аустенітизація визначає ступінь розчинення карбідів і однорідність хімічного складу матриці, гартування формує пересичений мартенсит, а відпуск контролює співвідношення між твердістю, пластичністю та корозійною стійкістю. Саме на етапі відпуску виникає необхідність пошуку компромісу між підвищенням експлуатаційної надійності та збереженням захисної ролі хрому в твердому розчині.

У сучасних умовах додаткової актуальності ця проблема набуває у зв'язку з використанням нових технологій виготовлення, зокрема адитивного виробництва, де вихідна мікроструктура сталі AISI 420 істотно відрізняється від структури традиційно прокатаних або кованих заготовок. Це вимагає перегляду класичних схем термічної обробки та глибшого розуміння процесів структурної еволюції. Тому вивчення впливу термічної обробки на структуру й властивості мартенситної корозійностійкої сталі AISI 420 є важливим завданням підготовки фахівців у галузі матеріалознавства та інженерії поверхні.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, дослідження корозійностійких високохромистих сталей, а особливо аналіз ролі термічної обробки у формуванні структури та експлуатаційних властивостей сталі AISI 420, має не лише навчальне, але й практичне значення. Воно дозволяє зрозуміти фундаментальні зв'язки між складом, структурою та властивостями матеріалу й сформуванню науково обґрунтований підхід до вибору режимів обробки для забезпечення надійності та довговічності виробів у реальних умовах експлуатації.

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було використано інструменти штучного інтелекту виключно як допоміжний засіб для уточнення формулювань та опрацювання літератури, для побудови графіків за наданими дослідними даними.. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та сформульовані виключно з власного аналізу, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності. Усі літературні джерела було перевірено та встановлено їх оригінальність.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

КОРОЗІЙНОСТІЙКІ ВИСОКОХРОМИСТІ СТАЛІ, ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

1.1. Призначення і класифікація корозійностійких високохромистих сталей

Корозійностійкі високохромисті сталі – це група високолегованих сталей, у яких вміст хрому зазвичай достатній для формування на поверхні тонкої пасивної плівки (оксидів Cr), що різко знижує швидкість загальної корозії в широкому спектрі середовищ. У практиці матеріалознавства поняття “високохромисті” часто пов’язують із системами на основі Fe-Cr (і Fe-Cr-Ni), де хром є головним легувальним елементом, а корозійна стійкість є визначальною властивістю для вибору матеріалу в машинобудуванні, енергетиці, харчовій і хімічній промисловості, водопідготовці та морських застосуваннях. Особливо показовими є ферито-аустенітні, які поєднують високу міцність і підвищену стійкість до локальної корозії та корозійного розтріскування в хлоридних середовищах, що розширює їх використання у водних і промислових системах [1, 2].

Корозійностійкі високохромисті сталі становлять одну з найважливіших груп конструкційних матеріалів сучасного машинобудування, енергетики та хімічної промисловості. Їх основне призначення полягає у забезпеченні тривалої та надійної роботи деталей і конструкцій в агресивних середовищах, де одночасно діють корозійні чинники, механічні навантаження та температурні впливи. Вирішальним фактором, що визначає корозійну стійкість цих сталей, є підвищений вміст хрому, здатного формувати на поверхні металу тонку, щільну й самовідновлювану пасивну плівку оксиду хрому, яка різко знижує швидкість електрохімічних процесів корозії [3].

У промисловій практиці високохромисті корозійностійкі сталі застосовують для виготовлення обладнання, яке контактує з водними розчинами,

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

кислотами, лугами, солями, парою, а також працює в умовах змінних температур і тисків. Типовими прикладами є трубопроводи та теплообмінники хімічних і енергетичних установок, резервуари для зберігання агресивних рідин, насосне й арматурне обладнання, елементи харчових і фармацевтичних ліній, а також деталі машин і механізмів (рисунок 1.1), де необхідне поєднання корозійної стійкості з високою міцністю та зносостійкістю.

Окрему групу становлять вироби відповідального призначення, зокрема медичні та хірургічні інструменти, елементи авіаційної та енергетичної техніки, деталі насосів і компресорів. У таких випадках корозійностійкі високохромисті сталі розглядаються не лише як матеріали з підвищеною хімічною стійкістю, а як функціональні матеріали, властивості яких можуть цілеспрямовано змінюватися шляхом легування та термічної обробки [4, 5].



Рисунок 1.1 – Приклади виробів з нержавіючою високохромистої сталі:

- а – хірургічні інструменти;
- б – помпа для харчової промисловості;
- в – лопатки газотурбінного двигуна.

Класифікація корозійностійких високохромистих сталей базується передусім на структурному стані, оскільки саме мікроструктура визначає комплекс механічних, корозійних і технологічних властивостей. Додатково враховують хімічний склад, вміст легувальних елементів, можливість термічної обробки та умови експлуатації.

Мікроструктура безпосередньо визначає комплекс властивостей і допустимі режими термічної обробки. Виділяють феритні (переважно FeC-r), мартенситні (Fe-Cr-C з можливими Mo, V тощо), аустенітні (Fe-Cr-Ni), а також дуплексні (приблизно 50/50 ферит плюс аустеніт). Мартенситні сталі типу AISI 420 відрізняються високою твердістю та зносостійкістю, але зазвичай поступаються аустенітним за корозійною стійкістю в хлорид-вмісних середовищах.

Доцільно розглядати чотири основні структурні класи: феритні, мартенситні, аустенітні та дуплексні корозійностійкі сталі. Кожен із цих класів має чітко визначену область застосування, обумовлену поєднанням корозійної стійкості, міцності, пластичності та технологічності.

Феритні сталі характеризуються феритною (ОЦК) структурою та підвищеним вмістом хрому, зазвичай у межах 12...30 %. Вони не містять або містять мінімальну кількість нікелю, що зумовлює їх відносно низьку вартість. Основною перевагою феритних сталей є добра стійкість до рівномірної корозії та окиснення, зокрема за підвищених температур. Водночас вони мають обмежену пластичність і в'язкість, що звужує сферу їх використання у відповідальних конструкціях [6].

Такі сталі застосовують у теплообмінному обладнанні, елементах побутової техніки, автомобільних вихлопних системах, а також у деталях, де корозійна стійкість важливіша за високі механічні характеристики.

Мартенситні сталі містять 12...18 % хрому та підвищений вміст вуглецю, що дозволяє отримувати мартенситну структуру після гартування. Їх характерною особливістю є можливість значного підвищення твердості, міцності та зносостійкості шляхом термічної обробки. Саме ця група сталей широко застосовується для виготовлення ріжучого, вимірювального й хірургічного інструменту, клапанів, валів, штоків і деталей насосів.

Корозійна стійкість мартенситних сталей є помірною і значною мірою залежить від режимів термічної обробки. Виділення карбідів хрому може

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

призводити до локального зниження концентрації хрому в матриці, що погіршує стабільність пасивної плівки. Тому при використанні цих сталей важливим є правильний вибір температур гартування та відпуску [7].

Аустенітні сталі містять підвищений вміст хрому (зазвичай понад 18 %) і нікелю, що стабілізує аустенітну (ГЦК) структуру. Вони вирізняються високою пластичністю, доброю зварюваністю та найвищою серед традиційних сталей корозійною стійкістю в багатьох агресивних середовищах. Саме аустенітні сталі є найбільш поширеними у хімічній, харчовій та фармацевтичній промисловості [7].

Разом із тим для цих сталей характерна схильність до корозійного розтріскування під напруженням у хлоридних середовищах, що обмежує їх застосування за певних умов експлуатації. Це зумовлює необхідність ретельного вибору матеріалу з урахуванням реального робочого середовища.

Дуплексні сталі мають двофазну ферито-аустенітну структуру з приблизно рівним співвідношенням фаз. Вміст хрому в них зазвичай становить 20...28 %, а додаткове легування молібденом і азотом значно підвищує стійкість до пітингової та щілинної корозії. Поєднання високої міцності, підвищеної корозійної стійкості та кращої, ніж у аустенітних сталей, опірності корозійному розтріскуванню робить дуплексні сталі особливо привабливими для морських і нафтогазових застосувань.

Їх використовують у теплообмінниках, морських конструкціях, трубопроводах, обладнанні для знесолення води та хімічних установках. Водночас ці сталі є чутливими до порушення технологічних режимів, зокрема під час зварювання та термічної обробки [8, 9].

За призначенням високохромисті корозійностійкі сталі застосовують у вузлах, де одночасно діють механічні навантаження й агресивні середовища: трубопроводи та арматура, теплообмінники, реактори, насоси, резервуари, елементи морської інфраструктури, обладнання водоочищення та знесолення.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим аргументом є й «економіка життєвого циклу»: вища ціна матеріалу може компенсуватися зменшенням простоїв, ремонтів і втрат металу.

1.2. Роль хрому та інших легувальних елементів у формуванні корозійної стійкості

Ключова причина корозійної стійкості високохромистих сталей – здатність утворювати пасивний шар, збагачений оксидами хрому. За наявності кисню та відповідного потенціалу пасивна плівка може самовідновлюватися після локальних пошкоджень, що суттєво знижує швидкість загальної корозії. Однак у реальних умовах експлуатації матеріал часто руйнується не загальною, а локальною корозією (пітинг, щілинна корозія), і саме тут проявляється роль не лише Cr, але й Mo та N.

Окрім Cr, Mo і N, значний вплив мають Ni, Mn, Si, Cu, а також вуглець. Нікель стабілізує аустеніт і підвищує пластичність та в'язкість, а в дуплексних сталях разом із азотом забезпечує потрібний баланс ферит/аустеніт, який критично залежить і від термообробки.

Молібден підсилює стійкість проти пітингу та щілинної корозії, однак може ускладнювати технологічність (наприклад, сприяти формуванню небажаних інтерметалічних фаз за неправильних термічних циклів у дуплексних сталях). Азот – один із найефективніших елементів для стабілізації аустеніту в дуплексних системах, але він також змінює чутливість до зварювальних режимів через вплив на фазові перетворення у зоні термічного впливу.

Вуглець, з одного боку, необхідний для формування карбідів і досягнення високої твердості в мартенситних сталях (типу AISI 420), але з іншого – може знижувати корозійну стійкість через утворення карбідів $Cr_{23}C_6$ на межах зерен і локальне збіднення прилеглих зон хромом (умови для міжкристалітної корозії). Тому для корозійностійких сталей важливо розуміти компроміс

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«твердість/міцність ↔ корозійна стійкість» і пояснювати його через фазовий склад і дифузійні процеси.

Хром є ключовим легувальним елементом, який визначає корозійну стійкість сталей за рахунок формування на поверхні пасивної оксидної плівки Cr_2O_3 . Ефективність цього захисту безпосередньо залежить від вмісту хрому в твердому розчині та його розподілу в мікроструктурі.

При вмісті хрому до близько 10...11 % сталь поводить себе подібно до низьколегованих: захисна плівка є нестабільною, легко руйнується в агресивних середовищах, а корозія має переважно загальний характер. Такий вміст хрому є недостатнім для стійкої пасивації [10].

За вмісту хрому приблизно 12...13 % досягається критичний поріг пасивації (рисунок 1.2). На поверхні формується суцільна та самовідновлювана плівка оксиду хрому, що різко знижує швидкість корозії. Саме з цього рівня сталі вважають корозійностійкими. Однак у цьому інтервалі матеріал ще чутливий до локальних форм корозії, особливо при структурній неоднорідності.

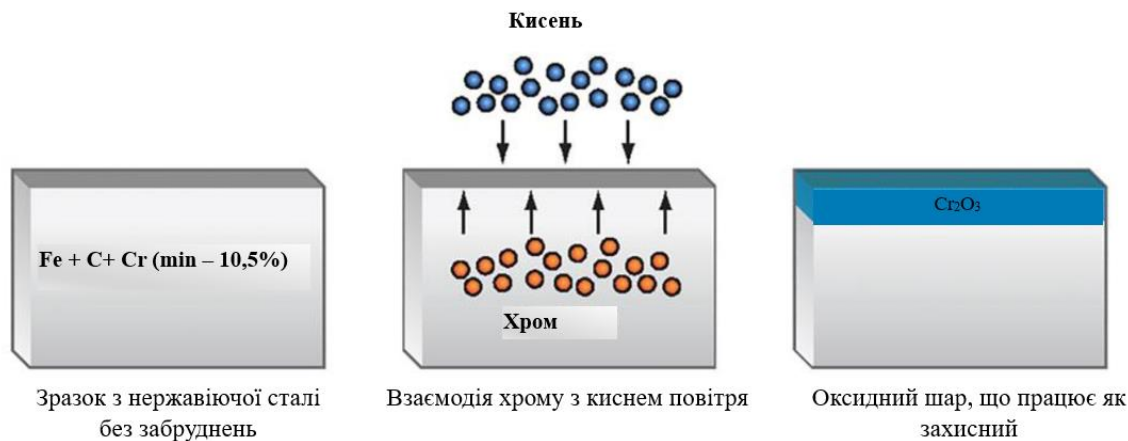


Рисунок 1.2 – Схема пасиваційних процесів

У діапазоні 13...18 % Cr, характерному для мартенситних нержавіючих сталей (зокрема AISI 420), забезпечується помірна корозійна стійкість у поєднанні з високими механічними властивостями після термічної обробки. Водночас корозійна поведінка сильно залежить від карбідного стану: виділення

карбідів $Cr_{23}C_6$ може локально збіднювати матрицю хромом і знижувати ефективність пасивної плівки.

За вмісту хрому 18...25 % (аустенітні та дуплексні сталі) формується більш стабільна пасивна плівка, зростає опір пітинговій і щілинній корозії, особливо за наявності додаткових елементів (Mo, N). Такі сталі придатні для роботи в хлоридних і хімічно активних середовищах [9].

При вмісті хрому понад 25 % (високохромисті феритні та супердуплексні сталі) досягається максимальна корозійна та окалиностійкість, у тому числі при підвищених температурах. Однак надлишок хрому може погіршувати технологічність і сприяти утворенню крихких інтерметалічних фаз за неправильних режимів термічної обробки.

Хром забезпечує корозійну стійкість лише за умови:

- достатнього загального вмісту (вище критичного порогу пасивації);
- збереження хрому в твердому розчині;
- відсутності інтенсивного карбідоутворення, яке локально знижує концентрацію Cr біля меж зерен.

1.3. Структурні особливості

Мікроструктура високохромистих корозійностійких сталей є визначальним чинником, що формує їх механічні, корозійні та технологічні властивості. Саме через мікроструктурний стан реалізується вплив хімічного складу, термічної та термомеханічної обробки, а також умов експлуатації. Для цих сталей характерною є висока чутливість структури до теплових впливів, що зумовлює необхідність чіткого контролю фазового складу та карбідного стану.

Спільною мікроструктурною особливістю всіх високохромистих сталей є наявність хрому в твердому розчині заліза, який забезпечує формування пасивної плівки на поверхні металу. Однак реальний розподіл хрому в структурі є неоднорідним і залежить від фазового складу та присутності карбідів або

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

інтерметалічних фаз. Виділення карбідів хрому типу $Cr_{23}C_6$ або Cr_7C_3 може призводити до локального збіднення матриці хромом, що безпосередньо впливає на корозійну стійкість, особливо в приповерхневих шарах і на межах зерен.

Для високохромистих сталей характерні такі структурні елементи:

- ферит або аустеніт як матричні фази;
- мартенсит у сталях, що піддаються гартуванню;
- карбіди хрому та легувальних елементів;
- міжфазні та міжкристалітні межі з підвищеною дифузійною активністю.

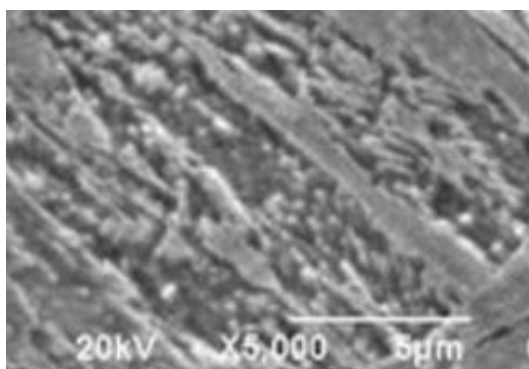
Феритні високохромисті сталі мають однофазну феритну (ОЦК) структуру з високим вмістом хрому, що рівномірно розчинений у матриці. Для цієї структури характерні відносно великі зерна, особливо після тривалої експлуатації або високотемпературної обробки. Карбіди у феритних сталях зазвичай представлені дрібнодисперсними виділеннями на межах зерен або всередині зерен.

Мікроструктура феритних сталей забезпечує добру стійкість до рівномірної корозії та окиснення, однак обмежує пластичність і в'язкість. За наявності домішок або при неправильній термічній обробці можливе утворення крихких фаз, що негативно впливають на експлуатаційну надійність.

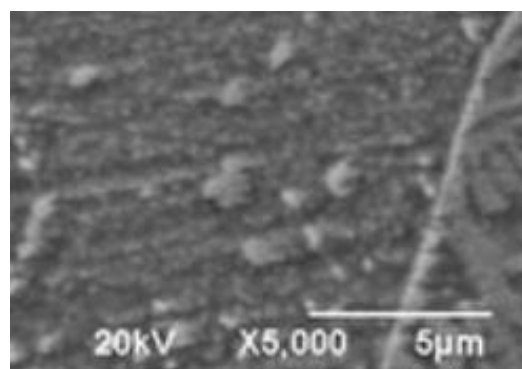
Мартенситні високохромисті сталі формують свою характерну мікроструктуру внаслідок гартування з аустенітного стану. Основною фазою є мартенсит із високою щільністю дислокацій, що зумовлює підвищену твердість і міцність. У структурі також присутні карбіди хрому (рисунок 1.3), розподіл яких значною мірою залежить від температури аустенітизації та режимів відпуску [11].

Після гартування структура є пересиченою та напруженою, а відпуск призводить до поступового виділення карбідів і стабілізації мартенситу. Саме на цьому етапі формується компроміс між твердістю, пластичністю та корозійною стійкістю. Надмірне карбідоутворення на межах зерен або пакетів мартенситу може спричинити схильність до міжкристалітної та пітингової корозії.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 1.3 – Типова мартенситна структура з карбідами (а, б)

Аустенітні високохромисті сталі характеризуються стабільною аустенітною (ГЦК) структурою, яка зберігається в широкому температурному діапазоні. Хром і нікель рівномірно розподілені в матриці, що забезпечує високу пластичність і загальну корозійну стійкість. Мікроструктура зазвичай дрібнозерниста після розчинного відпалу.

Небажаним мікроструктурним явищем є сенсibiliзація, пов'язана з виділенням карбідів $Cr_{23}C_6$ на межах зерен у температурному інтервалі приблизно 500...800 °С. Це призводить до локального збіднення приграничних зон хромом і втрати стійкості до міжкристалітної корозії [12].

Дуплексні високохромисті сталі мають двофазну ферито-аустенітну мікроструктуру з приблизно рівним співвідношенням фаз. Така структура поєднує високу міцність фериту з пластичністю аустеніту та забезпечує підвищену стійкість до локальної корозії й корозійного розтріскування.

Критично важливим є збереження балансу фаз, оскільки надлишок фериту або аустеніту, а також утворення інтерметалічних фаз (σ -фази, χ -фази) різко погіршують ударну в'язкість і корозійну стійкість. Мікроструктура дуплексних сталей є особливо чутливою до зварювання та тривалих термічних витримок [13].

Мікроструктурні особливості високохромистих корозійностійких сталей визначаються типом матричної фази, характером і розподілом карбідних та інтерметалічних виділень, а також станом меж зерен. Саме контроль

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроструктури шляхом легування, термічної та термомеханічної обробки дозволяє забезпечити необхідний баланс між корозійною стійкістю, міцністю та довговічністю виробів. Для інженерної практики це означає, що оцінка властивостей високохромистих сталей повинна завжди спиратися на аналіз їх мікроструктурного стану, а не лише на номінальний хімічний склад.

1.4. Особливості термічної обробки залежно від класу сталей

Термічна обробка корозійностійких високохромистих сталей завжди підпорядкована одній і тій самій логіці: потрібно або сформувати потрібну фазову/карбідну структуру (для міцності й зносостійкості), або відновити однорідність твердого розчину хрому (для корозійної стійкості), при цьому не допустити випадіння шкідливих фаз (карбідів $Cr_{23}C_6$ на межах зерен, σ -фази тощо). Саме тому режими ТО істотно різняться залежно від структурного класу сталі.

У високохромистих сталях корозійна стійкість визначається тим, скільки хрому залишається в матриці для підтримання пасивної плівки. Якщо під час нагрівання/витримки в «небезпечному» інтервалі температур відбувається виділення карбідів хрому на межах зерен, прилеглі зони збіднюються Cr і стають чутливими до міжкристалітної корозії (сенсibiliзація). Саме тому для багатьох нержавіючих сталей ключовою операцією є розчинний відпал (solution annealing) з подальшим швидким охолодженням, яке «заморожує» однорідний склад твердого розчину [14, 15].

Друга загальна закономірність стосується багатофазних систем (передусім дуплексів): повільне охолодження або витримки в певних діапазонах температур здатні спричинити випадіння інтерметалічних фаз (σ , χ тощо), що різко погіршує ударну в'язкість і корозійну стійкість.

Феритні сталі (Cr приблизно 12...30 %) мають феритну матрицю і не зміцнюються гартуванням у класичному сенсі, бо не проходять повноцінного

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

перетворення «аустеніт → мартенсит», характерного для мартенситних класів. Тому їх ТО спрямована на зняття напружень, відновлення пластичності після деформації, стабілізацію структури та покращення корозійної поведінки за рахунок вирівнювання складу і контролю карбідо/нітридоутворення [14].

Практично важливо уникати режимів, що викликають надмірний ріст зерна (погіршення в'язкості), а також витримок, які можуть активувати небажані виділення на межах зерен. Для феритних сталей часто застосовують відпал (у тому числі рекристалізаційний після холодної деформації) та помірний stress-relief, але конкретні температури підбирають під марку і товщину виробу, щоб не втратити ударну в'язкість.

Мартенситні сталі (типово 12...18% Cr; приклад – AISI 420) є «найбільш термічно керованими»: їхні властивості задаються комбінацією аустенітизації, гартування і відпуску. Під час аустенітизації частина карбідів розчиняється, матриця збагачується C і Cr; гартування формує пересичений мартенсит із високими внутрішніми напруженнями; відпуск керує виділенням карбідів і балансом «твердість-в'язкість-корозійна стійкість» [16].

Особливістю для високохромистих мартенситних сталей є карбідний стан після відпуску. З одного боку, карбіди потрібні для зміцнення та стабілізації структури; з іншого – їх надмірне або «неправильно локалізоване» випадіння може зменшувати ефективний вміст Cr у матриці й підвищувати схильність до локальної корозії (зокрема пітингу). Для AISI 420 у літературі також підкреслюють, що зміна температури відпуску суттєво впливає і на механічні, і на корозійні показники, тому режим підбирають під реальні умови середовища й навантаження.

Аустенітні сталі (зазвичай Cr більше рівне 18% із Ni та/або Mn як стабілізаторами) не зміцнюються гартуванням так, як мартенситні: швидке охолодження після нагрівання не дає мартенситу, а переважно зберігає аустеніт. Основна термічна операція тут – розчинний відпал з подальшим швидким охолодженням для розчинення карбідів і відновлення корозійної стійкості після

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварювання або роботи в «сенсibilізаційному» інтервалі [14]. У таблиці 1.1 подано ознаки мікроструктурних ризиків залежно від проведеної ТО.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика термічної обробки за класами сталей

Клас сталі	Типова ТО	Мікроструктурний ризик
Феритні	Відпал/стабілізація, зняття напружень	ріст зерна, небажані виділення на межах зерен
Мартенситні	Гартування та відпуск	надмірне карбідоутворення, падіння корозійної стійкості при невдалому відпуску
Аустенитні	Розчинний відпал та швидке охолодження	сенсibilізація ($Cr_{23}C_6$), міжкристалітна корозія
Дуплексні	Розчинний відпал та швидке охолодження	σ -фаза/інтерметаліди при витримках і повільному охолодженні

1.5. Проблеми експлуатації та механізми деградації

Експлуатація корозійностійких високохромистих сталей відбувається, як правило, в умовах поєднання механічних навантажень, агресивних середовищ і температурних впливів, що зумовлює складний характер деградаційних процесів. Незважаючи на наявність пасивної плівки на основі оксидів хрому, ці сталі не є абсолютно корозійностійкими, а їх довговічність значною мірою визначається мікроструктурним станом, технологією виготовлення та реальними умовами експлуатації.

Механізми деградації мають, як правило, локальний характер і часто розвиваються приховано, що робить їх особливо небезпечними для деталей відповідального призначення.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

До типових проблем експлуатації належать:

- порушення стабільності пасивної плівки в хлоридних або кислих середовищах;
- наявність залишкових напружень після зварювання або гартування;
- структурна неоднорідність (карбіди, міжфазні межі, зони термічного впливу);
- поєднання корозії з циклічними або контактними навантаженнями.

У результаті деградація часто має комбінований характер, коли корозійні процеси прискорюють механічне руйнування, а деформація, у свою чергу, активує корозію.

Пітингова корозія є однією з найпоширеніших форм деградації високохромистих сталей (рис.1.4), особливо в середовищах, що містять хлориди. Вона розвивається внаслідок локального руйнування пасивної плівки і супроводжується утворенням глибоких корозійних порожнин при мінімальних загальних втратах маси.

Мікроструктурними передумовами пітингу є:

- локальне збіднення матриці хромом біля карбідів;
- неметалеві включення;
- шорстка або дефектна поверхня.

Пітингова корозія особливо небезпечна через раптовий характер відмов, коли деталь руйнується без значних зовнішніх ознак пошкодження.

Міжкристалітна корозія пов'язана з виділенням карбідів хрому $Cr_{23}C_6$ на межах зерен під час термічних впливів у небезпечному температурному інтервалі. Внаслідок цього прилеглі до меж зерен зони збіднюються хромом і втрачають здатність до пасивації.

Цей механізм є характерним для:

- мартенситних і аустенітних сталей;
- зварних з'єднань;
- деталей, що працюють при підвищених температурах.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

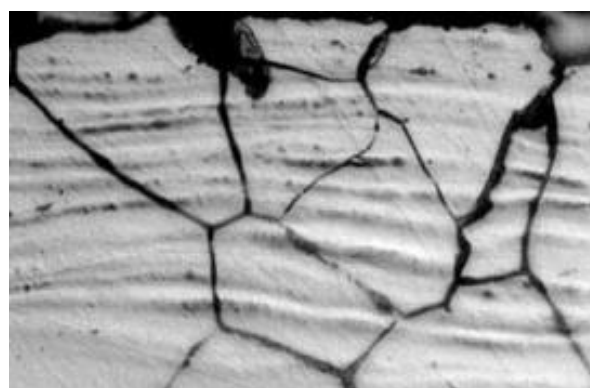
Міжкристалітна корозія призводить до різкого зниження міцності без значних змін геометрії деталі, що ускладнює її виявлення на ранніх стадіях.

Корозійне розтріскування під напруженням виникає при одночасній дії:

- корозійно-активного середовища;
- розтягувальних напружень (робочих або залишкових);
- підвищеної температури.



а



б

Рисунок 1.4 – Корозійне розтріскування (а) та міжкристалітна корозія (б) [17]

Особливо чутливими до міжкристалітної корозії є аустенітні та мартенситні високохромисті сталі в хлоридних середовищах. Руйнування має крихкий характер, тріщини поширюються вздовж зерен або кристалографічних напрямків, часто без значної пластичної деформації.

Корозійна втома розвивається за умов циклічних навантажень у корозійному середовищі. Корозія знижує опір ініціації тріщин, а втомні напруження прискорюють їх ріст [18, 19].

Для мартенситних високохромистих сталей корозійна втома є типовою причиною відмов валів, штоків, лопаток допоміжних механізмів і насосного обладнання.

За підвищених температур високохромисті сталі зазнають окиснення з утворенням окалини, склад і захисні властивості якої залежать від вмісту хрому. При недостатній концентрації Cr або тривалій експлуатації можливе порушення

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

суцільності оксидного шару, що призводить до прискореної деградації матеріалу.

Для дуплексних сталей додатковим ризиком є випадіння інтерметалічних фаз (σ -фази), що різко погіршує ударну в'язкість і корозійну стійкість.

Проблеми експлуатації корозійностійких високохромистих сталей зумовлені не відсутністю корозійної стійкості як такої, а порушенням балансу між хімічним складом, мікроструктурою, термічною історією та умовами роботи. Основні механізми деградації – пітинг, міжкристалітна корозія, корозійне розтріскування та корозійна втома – мають локальний і часто прихований характер, що вимагає ретельного контролю технології виготовлення, режимів термічної обробки та експлуатаційних параметрів.

1.6. Висновки та постановка завдання

Проведений аналіз корозійностійких високохромистих сталей дозволяє зробити узагальнений висновок, що ці матеріали являють собою складну багатофакторну систему, у якій експлуатаційна надійність визначається не лише номінальним хімічним складом, а насамперед мікроструктурним станом, сформованим у процесі виготовлення та термічної обробки. Хром виступає базовим легувальним елементом, що забезпечує формування пасивної плівки і, відповідно, корозійну стійкість, проте його ефективність безпосередньо залежить від розподілу в матриці та участі в карбідо- і фазоутворенні.

Класифікація високохромистих сталей за структурним принципом (феритні, мартенситні, аустенітні, дуплексні) дає змогу чітко простежити взаємозв'язок між типом мікроструктури, можливостями термічної обробки та характером деградаційних процесів. Феритні сталі вирізняються стабільною корозійною поведінкою, але обмеженими механічними властивостями; аустенітні — високою пластичністю і загальною корозійною стійкістю, проте схильністю до корозійного розтріскування під напруженням; дуплексні –

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимальним поєднанням міцності та корозійної стійкості за умови суворого дотримання технологічних режимів. Особливе місце займають мартенситні високохромисті сталі, для яких термічна обробка є головним інструментом керування властивостями.

На прикладі сталі типу AISI 420 показано, що термічна обробка має подвійну функцію: з одного боку, вона забезпечує високі показники твердості, міцності та зносостійкості, а з іншого – істотно впливає на корозійну поведінку через зміну карбідного стану і локальний перерозподіл хрому. Неправильно підібрані режими аустенізації та відпуску можуть призводити до сенсibilізації, зниження стійкості до пітингової та міжкристалітної корозії, а також до підвищеної схильності до корозійного розтріскування.

Аналіз механізмів деградації підтверджує, що руйнування високохромистих сталей у реальних умовах експлуатації має переважно локальний і комбінований характер. Пітингова корозія, міжкристалітна корозія, корозійна втома та корозійне розтріскування під напруженням часто розвиваються приховано і можуть призводити до раптових відмов конструкцій. Це зумовлює необхідність комплексного підходу до вибору матеріалу, який враховує не лише агресивність середовища, а й рівень механічних навантажень, температурний режим, спосіб виготовлення та післяобробки.

Мартенситна корозійностійка сталь AISI 420 є типовим представником високохромистих сталей, для яких термічна обробка є головним інструментом керування властивостями. На відміну від аустенітних або феритних сталей, де ТО має переважно стабілізаційний характер, у сталі AISI 420 саме комбінація аустенізації – гартування – відпуску визначає фазовий склад, карбідний стан, рівень внутрішніх напружень і, як наслідок, експлуатаційну надійність.

Особливістю цієї сталі є поєднання підвищеного вмісту хрому (приблизно 12...14 %) та вуглецю, що створює потенціал для отримання високої твердості й зносостійкості, але водночас робить матеріал чутливим до неправильних режимів термічної обробки. Саме тому дослідження впливу ТО на

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

структуру і властивості AISI 420 має не лише теоретичне, а й безпосереднє прикладне значення.

Дослідження впливу термічної обробки на структуру і властивості високохромистої сталі AISI 420 підтверджує, що термічна обробка є визначальним фактором формування її експлуатаційної надійності. Саме через керування фазовим складом, карбідним станом і рівнем внутрішніх напружень можливо цілеспрямовано змінювати механічні та корозійні характеристики матеріалу.

З урахуванням особливостей цієї сталі, термічну обробку слід розглядати не як стандартну технологічну операцію, а як обґрунтований процес оптимізації структури, який має бути адаптований до конкретних умов експлуатації виробу. Це робить тему дослідження особливо актуальною для матеріалознавчих і інженерних робіт, спрямованих на підвищення довговічності та безпеки виробів з мартенситних корозійностійких сталей.

З урахуванням проведеного аналізу доцільно сформулювати такі основні задачі дослідження:

1. Оцінити вплив режиму ВТМО на фазовий склад, карбідний стан і розподіл хрому в структурі високохромистих сталей.
2. Дослідити структуру сталі AISI 420 після стандартної термічної обробки та після ВТМО. Визначити переваги та недоліки обох обробок
3. Дослідити зміни механічних властивостей – твердості, межі міцності на розрив та ударної в'язкості після виконання обраних режимів ТО.
4. Встановити доцільність проведення ВТМО.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Термічна обробка високохромистої сталі AISI 420

Термічна обробка мартенситної корозійностійкої сталі AISI 420 є визначальним чинником формування її мікроструктури та комплексу експлуатаційних властивостей. На відміну від аустенітних або феритних нержавіючих сталей, де термічна обробка має переважно стабілізаційний характер, для AISI 420 саме правильно підібрана послідовність аустенітизації, гартування та відпуску забезпечує необхідний баланс між твердістю, міцністю, зносостійкістю та корозійною поведінкою.

Сталь AISI 420 належить до мартенситного класу високохромистих сталей і містить, як правило, близько 12...14 % Cr та підвищену кількість вуглецю. Такий склад дозволяє формувати пересичений мартенсит після гартування, однак одночасно робить матеріал чутливим до режимів термічної обробки. Властивості сталі значною мірою визначаються карбідним станом і ступенем збереження хрому в твердому розчині, що безпосередньо впливає на корозійну стійкість. Аустенітизація є першим і принципово важливим етапом термічної обробки сталі AISI 420. Зазвичай її проводять у температурному інтервалі 980...1050 °C (рисунок 2.1). У цьому діапазоні відбувається часткове або майже повне розчинення карбідів хрому типу Cr₂₃C₆ та вирівнювання хімічного складу аустеніту.

Недостатня температура або тривалість аустенітизації призводить до збереження грубих карбідів, що знижує твердість після гартування і спричиняє локальне збіднення матриці хромом. Надмірне підвищення температури, навпаки, може викликати ріст зерна аустеніту, що негативно позначається на ударній в'язкості та сприяє крихкому руйнуванню. Тому вибір температури

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ауспенізації завжди є компромісом між розчиненням карбідів і стабільністю зернистої структури.

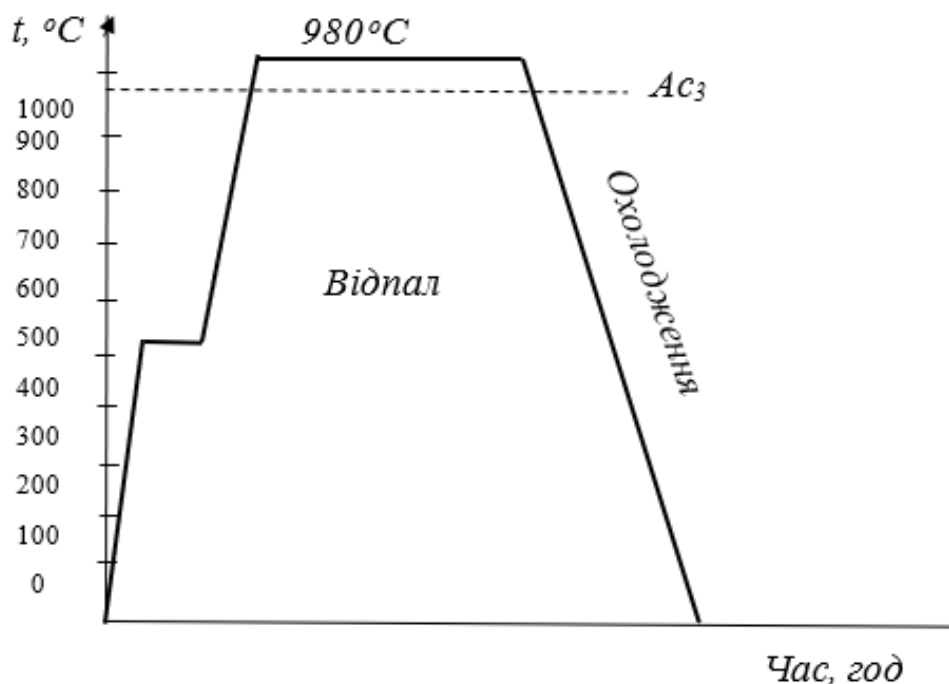


Рисунок 2.1 – Графік режиму відпалу сталі AISI 420

Ауспенізацію зазвичай проводять в температурному інтервалі 980...1050 °C з витримкою, достатньою для часткового розчинення карбідів хрому та вирівнювання хімічного складу аустеніту. Гартування здійснюють переважно з охолодженням у маслі або на повітрі, що забезпечує формування мартенситної структури при зниженні ризику термічних тріщин [20].

Відпуск загартованих зразків проводять з тривалістю витримки від 1 до 10 годин у температурному інтервалі 200...500 °C залежно від поставленої мети. Низькотемпературний відпуск застосовують для збереження високої твердості та зносостійкості, тоді як відпуск за підвищених температур дозволяє дослідити вплив карбідоутворення на мікроструктуру та корозійну поведінку сталі. Охолодження після відпуску здійснюють на повітрі або в маслі; у випадках можливої реалізації відпускнуї крихкості використовували прискорене охолодження в маслі.

Після ауспенізації сталь AISI 420 піддають гартуванню з охолодженням у маслі або на повітрі. Водяне гартування застосовується обмежено через

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищений ризик утворення гартувальних тріщин. У процесі швидкого охолодження відбувається мартенситне перетворення аустеніту, внаслідок чого формується пересичений мартенсит із високою щільністю дислокацій і значними внутрішніми напруженнями.

Загартований стан характеризується максимальною твердістю та зносостійкістю, проте є структурно нестабільним і схильним до крихкого руйнування та корозійного розтріскування під напруженням. Саме тому гартування розглядається як проміжний етап, що обов'язково має завершуватися відпуском.

Відпуск є ключовою операцією термічної обробки сталі AISI 420, оскільки саме на цьому етапі формується остаточний комплекс властивостей. Залежно від температури відпуску змінюється характер карбідних виділень і рівень внутрішніх напружень [21].

Низькотемпературний відпуск у межах 200...300 °C дозволяє зберегти високу твердість і зносостійкість, однак корозійна стійкість у цьому стані може бути обмеженою через напружений стан мартенситу. Відпуск у середньотемпературному інтервалі 400...500 °C сприяє інтенсивному виділенню карбідів хрому, зниженню крихкості та підвищенню пластичності, проте може призводити до локального збіднення матриці хромом і зростання схильності до міжкристалітної та пітингової корозії.

У сучасній практиці все частіше застосовують оптимізовані або багатоступеневі режими відпуску, які дозволяють стабілізувати мартенситну структуру без критичного зниження ефективного вмісту хрому в твердому розчині.

Комплексна термічна обробка сталі AISI 420 забезпечує:

- високу твердість і зносостійкість завдяки мартенситній структурі;
- регулювання міцності та пластичності шляхом вибору температури відпуску;

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– контроль корозійної поведінки через керування карбідним станом і розподілом хрому.

Таким чином, саме термічна обробка визначає можливість використання сталі AISI 420 для виготовлення ріжучих інструментів, хірургічних виробів, клапанів, валів та інших деталей, що працюють у поєднанні механічних навантажень і помірно агресивних середовищ.

2.2. Вибір режиму обробки сталі AISI 420

Вибір технології зміцнення сталі AISI 420 визначається умовами експлуатації виробу та вимогами до комплексу механічних властивостей (таблиця 2.1). Звичайна термічна обробка є доцільною для деталей, що працюють переважно на знос і не зазнають значних ударних навантажень або низькотемпературної експлуатації. Вона відрізняється технологічною простотою та широко застосовується у промисловості.

Разом з тим для виробів, що працюють в умовах підвищених динамічних навантажень або при знижених температурах, ефективнішою є високотемпературна термомеханічна обробка. Застосування ВТМО дозволяє сформувати дрібнодисперсну мартенситну структуру з підвищеною ударною в'язкістю та зниженим ризиком інтеркристалітного руйнування. Саме ці переваги роблять ВТМО перспективною технологією для відповідальних виробів з високохромистих сталей мартенситного класу.

Для сталі AISI 420 традиційна термічна обробка (рисунок 2.2) є базовим та універсальним методом зміцнення, тоді як ВТМО доцільно застосовувати у випадках, коли необхідно підвищити надійність та експлуатаційну стійкість матеріалу без істотного зниження пластичних властивостей.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Характеристики сталі AISI 420 при використанні ВТМО

Параметр	Характеристика
Клас сталі	Мартенситна корозійностійка, близько 13 % Cr
Типова структура після ТО	Пакетно-реєчний мартенсит з карбідами $Cr_7C_3/Cr_{12}C_6$
Схильність до крихкого руйнування	Підвищена, особливо при низьких температурах
Температурний інтервал аустенізації	980...1050 °C
Температура деформації при ВТМО	Нижче температури аустенізації, без рекристалізації
Ступінь гарячої деформації	Середній (прокатка, кування, обтиск)
Охолодження після деформації	Швидке (гартування на мартенсит, можливе охолодження на повітрі)
Заключна операція	Високий відпуск, 620...700 °C
Основний ефект ВТМО	Подрібнення мартенситу, зростання σ_B , підвищення КСЧ
Вплив на відпускну крихкість	Послаблення проявів зворотної відпускну крихкості
Обмеження	Ризик виділення карбідів при витримках і паузах між деформацією та гартуванням

Основна мета високотемпературної термічної обробки сталі AISI 420:

- формування однорідного аустенітного стану з максимальним розчиненням карбідів хрому;
- одержання мартенситної структури після загартування;
- стабілізація структури та зниження внутрішніх напружень при відпуску без суттєвого зниження міцності.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

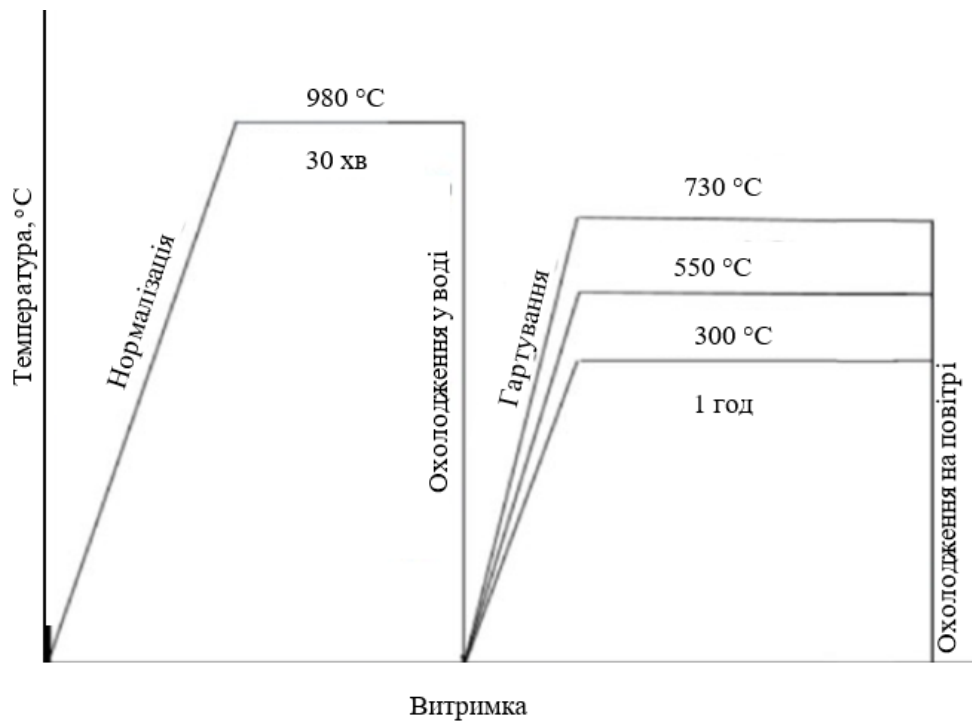


Рисунок 2.2 – Графік класичної термічної обробки для сталі AISI 420

Високотемпературний нагрів сталі AISI 420 здійснюють у температурному інтервалі 980...1050 °C. Обґрунтування вибору цього діапазону базується на фазових перетвореннях у системі Fe-Cr-C.

За температур нижче 950 °C розчинення карбідів типу Cr_7C_3 та $(Cr,Fe)_{23}C_6$ є неповним, що призводить до:

- зниження вмісту вуглецю та хрому в аустеніті;
- зменшення прогартовуваності;
- формування неоднорідної мартенситної структури після охолодження.

Підвищення температури аустенітизації до 980...1050 °C забезпечує інтенсивне розчинення карбідної фази, збагачення аустеніту вуглецем і хромом та підвищення стабільності переохолодженого аустеніту. Це, у свою чергу, сприяє утворенню повноцінного мартенситу при загартуванні.

Водночас перевищення верхньої межі (понад 1050...1070 °C) є небажаним, оскільки призводить до укрупнення аустенітного зерна, що негативно впливає на ударну в'язкість і підвищує схильність до крихкого руйнування. Таким чином, діапазон 980...1050 °C є компромісом між повнотою аустенітизації та контролем розміру зерна.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після витримки при температурі аустенізації сталь піддають гартуванню з метою фіксації аустенітного стану шляхом мартенситного перетворення. Висока прогартуваність сталі AISI 420 дозволяє застосовувати різні охолоджувальні середовища залежно від розмірів і конфігурації виробу.

Для масивних деталей доцільним є охолодження в маслі, що забезпечує достатню швидкість охолодження без ризику утворення термічних тріщин. Для тонкостінних або середніх перерізів можливе охолодження на повітрі, оскільки стабільність переохолодженого аустеніту гарантує утворення мартенситу навіть за помірних швидкостей охолодження.

У результаті гартування формується структура високодислокаційного пакетно-рейкового мартенситу, що забезпечує високу твердість і міцність, однак супроводжується значними внутрішніми напруженнями та зниженою пластичністю. Саме ці фактори зумовлюють необхідність подальшого відпуску.

Високий відпуск сталі AISI 420 проводять при температурах 620...700 °С, що є принципово важливим для формування експлуатаційно надійної структури. У цьому температурному інтервалі відбувається комплекс взаємопов'язаних процесів. Знижується рівень внутрішніх напружень, накопичених у мартенситі під час загартування, що підвищує пластичність і ударну в'язкість сталі. По-друге, відбувається контрольоване виділення карбідів типу $(Cr,Fe)_{23}C_6$, які рівномірно розподіляються в матриці та забезпечують стабілізацію структури без різкого зниження міцності.

Високий відпуск дозволяє зменшити схильність сталі до зворотної відпускнуї крихкості, характерної для високохромистих мартенситних сталей. Температури нижче 550...580 °С є небажаними, оскільки в цьому інтервалі можливе формування крихких структурних станів і підвищення чутливості до міжкристалітного руйнування. Відпуск при 620...700 °С є оптимальним з точки зору забезпечення стабільних механічних властивостей і експлуатаційної надійності сталі AISI 420.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Технологія високотемпературної термомеханічної обробки

Високотемпературна термомеханічна обробка сталі AISI 420 є розвитком класичної схеми термічного зміцнення і поєднує в собі аустенітизацію, гарячу пластичну деформацію, загартування та відпуск. Головною відмінністю ВТМО від звичайної термічної обробки є цілеспрямований вплив пластичної деформації на стан аустеніту перед загартуванням, що дозволяє активно керувати формуванням мартенситної структури. Застосування ВТМО для високохромистих мартенситних сталей обґрунтоване їх схильністю до крихкого руйнування та відпускнуої крихкості, що не завжди може бути повністю усунене лише вибором режимів гартування і відпуску.

Критично важливо проводити деформацію нижче температур рекристалізації, щоб зберегти деформовану субструктуру аустеніту, яка успадковується мартенситом після загартування.

Основною метою термомеханічної обробки сталі AISI 420 є:

- формування дрібнопакетної та однорідної мартенситної структури;
- підвищення ударної в'язкості без істотного зниження міцності;
- зменшення схильності до міжкристалітного та квазікрихкого руйнування;
- послаблення проявів зворотної відпускнуої крихкості.

Досягнення цих ефектів можливе завдяки зміні субструктури аустеніту ще до моменту мартенситного перетворення.

Високотемпературна термомеханічна обробка є методом зміцнення, що поєднує гарячу пластичну деформацію аустеніту з подальшим загартуванням і відпуском. На відміну від класичної термічної обробки, ВТМО дозволяє активно керувати формуванням структури ще на стадії аустенітного стану.

Суть технології полягає в тому, що після нагріву сталі до аустенітного стану проводять гарячу деформацію (прокатка, кування або обтиск) за температур, за яких не відбувається повна рекристалізація аустеніту. У

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результаті в аустеніті формується розвинена дислокаційна та субзернова структура. Подальше швидке охолодження фіксує цю структуру у вигляді дрібнопакетного мартенситу.

При ВТМО відбувається спадковість субструктури деформованого аустеніту в мартенситі, що проявляється у:

- підвищенні щільності дислокацій;
- зменшенні розмірів мартенситних пакетів;
- зростанні однорідності мікроструктури.

Для високохромистих сталей мартенситного класу ВТМО дозволяє підвищити не лише міцність, але й ударну в'язкість, а також зменшити схильність до крихкого руйнування. Особливо важливо, що ВТМО послаблює прояви зворотної відпускну крихкості, характерної для сталей типу AISI 420.

Першим етапом ВТМО є нагрів сталі AISI 420 до аустенітного стану. Аустенізація проводиться за режимами як і в класичній термічній обробці. При ВТМО аустенізація виконує не лише функцію фазової перебудови, але й створює вихідний стан для подальшої деформації. Тому тривалі витримки та надмірне перегрівання є небажаними, оскільки укрупнення аустенітного зерна знижує ефективність термомеханічного зміцнення.

Ключовим етапом ВТМО (рисунок 2.3) є гаряча пластична деформація сталі в аустенітному стані. Деформацію здійснюють після часткового підстужування від температури аустенізації до температур, нижчих за температуру повної рекристалізації аустеніту. Це принципово важливо для сталі AISI 420.

У цьому температурному інтервалі деформація призводить до накопичення високої щільності дислокацій в аустеніті; формування субзеренної структури; пригнічення рекристалізації та збереження деформованого стану аустеніту до моменту загартування.

Для високохромистих сталей надмірна деформація або тривалі паузи між деформацією і загартуванням можуть спричинити часткове виділення карбідів і

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

локальне збіднення аустеніту вуглецем і хромом. Тому ступінь деформації при ВТМО сталі AISI 420 зазвичай обмежують помірними значеннями, достатніми для формування субструктури, але без розвитку дифузійних процесів.

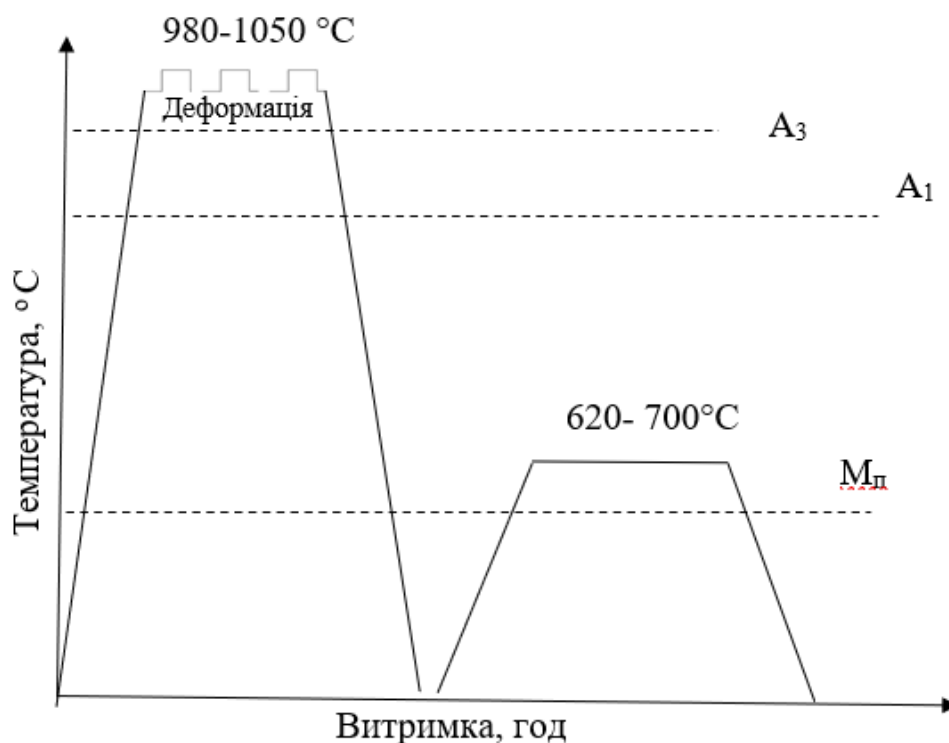


Рисунок 2.3 – Графік режиму ВТМО

Після завершення гарячої деформації проводять швидке охолодження, метою якого є фіксація деформованого аустеніту шляхом мартенситного перетворення. Висока стабільність переохолодженого аустеніту сталі AISI 420 дозволяє використовувати як охолодження в маслі, так і охолодження на повітрі для виробів невеликого перерізу.

Під час мартенситного перетворення відбувається так зване структурне спадкування: субструктура деформованого аустеніту передається мартенситу. У результаті формується:

- дрібнопакетний мартенсит;
- підвищена щільність дислокацій;
- більш однорідний розподіл кристалів мартенситу.

Саме це є головною причиною покращення механічних властивостей після ВТМО порівняно зі звичайною термічною обробкою.

Заключним етапом ВТМО сталі AISI 420 є високий відпуск при температурах 620...700 °С. Його призначення аналогічне звичайній термічній обробці, проте результати є більш вираженими.

Застосування високотемпературної термомеханічної обробки для сталі AISI 420 дозволяє сформувати дрібнодисперсну мартенситну структуру зі зниженим рівнем внутрішніх напружень та підвищеною ударною в'язкістю. У порівнянні зі звичайною термічною обробкою, ВТМО забезпечує більш сприятливий баланс міцності й пластичності та зменшує схильність сталі до крихкого руйнування.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Характеристика об'єкту дослідження

Об'єктом дослідження моєї роботи є мартенситна корозійностійка сталь AISI 420. Сталь AISI 420 є типовим представником високохромистих мартенситних сталей, властивості яких визначаються насамперед структурним станом, сформованим у процесі термічної або термомеханічної обробки.

Належить до класу високохромистих сталей із вмістом хрому близько 12...14 % та підвищеним вмістом вуглецю. Дана сталь широко застосовується у машинобудуванні, енергетиці, хімічному обладнанні та інструментальному виробництві, де необхідне поєднання високої твердості, зносостійкості та задовільної корозійної стійкості (таблиці 1, 2).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі AISI 420

Елемент	C	Cr	Mn	Si	P	S	Fe
Вміст	0,15...0,40	12,0...14,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 0,040	≤ 0,030	Основа

Сталь AISI 420 характеризується здатністю до формування мартенситної структури після загартування, високою прокаліюваністю та чутливістю до режимів термічної і термомеханічної обробки. Водночас для неї притаманні такі обмеження, як схильність до крихкого руйнування та зниження ударної в'язкості при несприятливих структурних станах, що зумовлює актуальність дослідження впливу режимів обробки на її структуру та властивості.

Предметом дослідження є вплив режимів термічної та високотемпературної термомеханічної обробки на формування мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей сталі AISI 420, зокрема на

					MP 1825.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			38

морфологію мартенситу, характер і розподіл карбідної фази, рівень внутрішніх напружень, твердість і ударну в'язкість.

Предмет дослідження також охоплює закономірності структурного спадкування при термомеханічній обробці та їх вплив на підвищення експлуатаційної надійності виробів зі сталі AISI 420.

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сталі AISI 420

Властивість	Характерне значення
Густина	7,7 г/см ³
Температура аустенізації	980...1050 °C
Твердість після загартування	до 50...56 HRC
Твердість після високого відпуску	35...45 HRC
Тимчасовий опір розриву σ_B	700...850 МПа
Межа текучості $\sigma_{0.2}$	450...650 МПа
Відносне подовження δ	10...18 %
Корозійна стійкість	задовільна в слабкоагресивних середовищах

Сталь AISI 420 застосовують для виготовлення виробів, що працюють в умовах підвищеного зносу, контактних навантажень і помірно агресивних середовищ, де необхідне поєднання високої твердості та корозійної стійкості.

Найбільш поширеними виробами зі сталі AISI 420 є:

- ріжучий і вимірювальний інструмент (ножі, леза, скальпелі, хірургічні інструменти);
- деталі машин і механізмів, що зазнають тертя (вали, осі, втулки, штифти);
- елементи насосного та клапанного обладнання (сідла клапанів, штоки, плунжери);
- підшипникові та напрямні елементи середнього навантаження;
- деталі енергетичного та хімічного обладнання, що працюють у вологих або слабкоагресивних середовищах;
- вироби побутового та спеціального призначення, де потрібна зносостійка корозійностійка поверхня.

Завдяки здатності до значного зміцнення термічною та термомеханічною обробкою сталь AISI 420 широко використовується для відповідальних деталей, у яких вирішальне значення мають структурний стан і стабільність механічних властивостей.

3.2. Методика досліджень мікроструктури та властивостей

Дослідження мікроструктури сталі AISI 420 проводили методом оптичної металографії з використанням сучасного цифрового металографічного мікроскопа у відбитому світлі. Дослідження мікроструктури проводили з використанням оптичного металографічного мікроскопа Olympus BX53M. Мікроструктуру досліджували методом оптичної металографії після стандартної підготовки шліфів [21, 22].

Зразки готували за стандартною металографічною методикою, що включала механічне шліфування абразивними паперами з поступовим зменшенням зернистості, тонке полірування та хімічне травлення з метою виявлення структурних складових. Спостереження проводили при різних збільшеннях у режимах світлого та темного поля.

Отримані мікроструктурні зображення фіксували цифровою камерою з подальшою обробкою та аналізом за допомогою програмного забезпечення, що дозволяло оцінити морфологію мартенситу, характер і розподіл карбідної фази, а також однорідність структури після різних режимів обробки.

Ударну в'язкість матеріалу визначали методом ударного згину на маятниковому копрі за стандартною методикою [24]. Випробування проводили на зразках з V-подібним надрізом при заданій температурі. Під час випробування вимірювали енергію, витрачену на руйнування зразка, яку визначали за різницею потенціальної енергії маятника до і після удару. Ударну в'язкість розраховували як відношення енергії руйнування до площі поперечного перерізу зразка в місці надрізу. Отримане значення характеризує опір матеріалу крихкому руйнуванню.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Межу міцності на розтяг визначали за результатами статичних випробувань на одновісний розтяг. Випробування проводили на стандартних зразках при кімнатній температурі з використанням універсальної випробувальної машини. Під час навантаження реєстрували діаграму «напруження-деформація». Межу міцності визначали як максимальне напруження, що відповідає найбільшому зусиллю, зафіксованому перед руйнуванням зразка, віднесеному до початкової площі його поперечного перерізу [25].

Твердість сталі визначали методом Роквелла за ISO 6508-1:2023 [26] за шкалою С (HRC) на твердомірі з алмазним конусним індентором (кут 120°). Випробування виконували на підготовленій рівній поверхні зразка після шліфування. Навантаження прикладали ступінчасто: попереднє (для встановлення нульової точки) та основне навантаження згідно з методикою, після чого фіксували глибину відбитка, що автоматично перераховувалась у значення HRC. Для підвищення достовірності проводили серію вимірювань у кількох точках; відбитки розміщували на достатній відстані один від одного та від краю зразка, після чого обчислювали середнє значення твердості.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ВТМО НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ AISI 420

4.1. Мікроструктура сталі AISI 420

Мартенситні нержавіючі сталі зазвичай постачаються в відпаленому стані і, як правило, після формування піддаються термічній обробці для поліпшення механічних властивостей. У стані після гарячої обробки тиском або відпалу структура сталі AISI 420 є феритно-карбідною. Металева матриця представлена феритом або ферито-перлітною сумішшю, у якій розміщені первинні та вторинні карбіди хрому типу Cr_7C_3 і $(Cr,Fe)_{23}C_6$. Карбіди можуть мати нерівномірний розподіл і часто локалізуються по межах зерен, що зумовлює порівняно невисоку твердість і підвищену пластичність сталі в цьому стані (рисунок 4.1). Такий стан типовий для середньо- та високовуглецевих мартенситних нержавіючих сталей

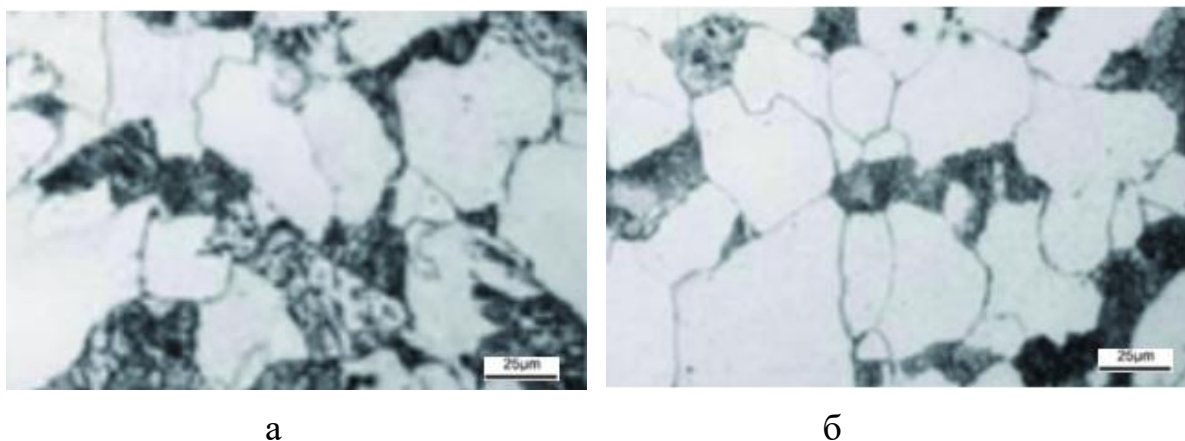


Рисунок 4.1 – Мікроструктура сталі AISI 420 до термічної обробки на різних ділянках шліфа

Такий структурний стан характеризується відносно низькою твердістю та високою пластичністю, проте не є придатним для експлуатації виробів, які потребують високої міцності й зносостійкості. Саме тому подальша структурна перебудова реалізується через термічну або термомеханічну обробку.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Після нагріву до аустенітного стану, загартування і подальшого високого відпуску формується структура відпущеного пакетно-рейкового мартенситу (рисунок 4.2). Мартенситні пакети мають дрібну й відносно однорідну будову, а в матриці рівномірно розподілені дисперсні карбіди хрому. Така структура забезпечує високу твердість, міцність і зносостійкість при одночасному зниженні внутрішніх напружень та покращенні ударної в'язкості порівняно зі станом після гартування без відпуску.

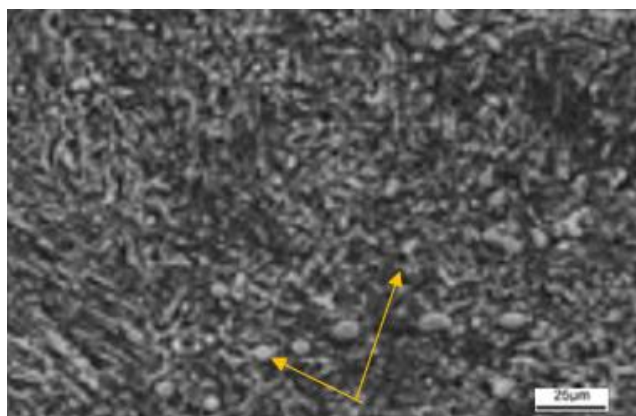


Рисунок 4.2 – Мікроструктура сталі після гартування (карбіди вказано стрілками)

До термічної обробки сталь AISI 420 має феритно-карбідну структуру з обмеженими міцнісними властивостями, тоді як після загартування і відпуску формується дрібнодисперсний відпущений мартенсит, що забезпечує оптимальний комплекс механічних і експлуатаційних характеристик.

4.2. Аналіз структурних змін після ВТМО

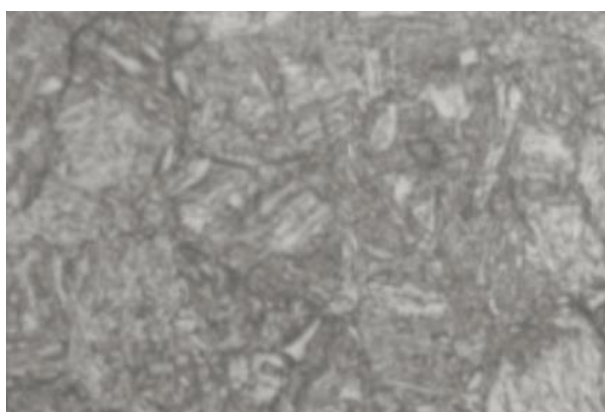
Відмінністю ВТМО від звичайної термічної обробки є гаряча пластична деформація аустеніту. Деформацію здійснюють за температур, за яких рекристалізація аустеніту або пригнічується, або відбувається неповністю. Після високотемпературної термомеханічної обробки структура сталі AISI 420 представлена дрібнопакетним відпущеним мартенситом, який відрізняється

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

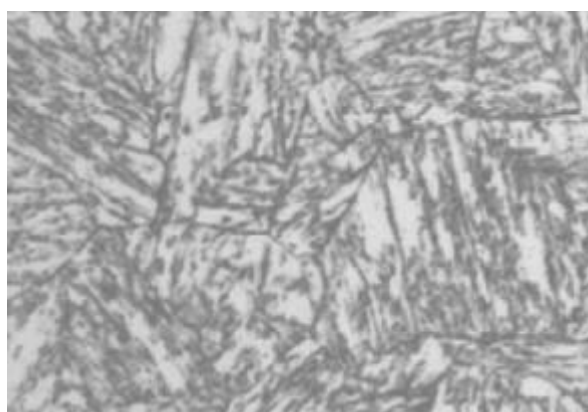
підвищеною структурною однорідністю порівняно зі станом після звичайної термічної обробки. Мартенситні пакети та рейки мають менші характерні розміри, а їх орієнтаційний розподіл є більш рівномірним. Карбідна фаза після відпуску представлена дрібнодисперсними карбідами хрому, рівномірно розподіленими в об'ємі мартенситної матриці.

Особливістю ВТМО є пластична деформація аустеніту перед загартуванням. У процесі гарячої деформації в аустеніті формується розвинена дислокаційна та субзернова структура, яка зберігається до моменту охолодження завдяки пригніченню рекристалізації (рисунок 4.3).

У високохромистих сталях типу AISI 420 наявність хрому та карбідів додатково ускладнює повну рекристалізацію аустеніту. Це дозволяє зберегти деформаційну субструктуру до моменту охолодження. Збереження деформованого стану аустеніту є необхідною умовою реалізації позитивного ефекту ВТМО для високохромистих сталей.



а



б

Рисунок 4.3 – Мікроструктура сталі AISI 420 після гартування

Під час мартенситного перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$ відбувається спадкування субструктури деформованого аустеніту. Це означає, що межі субзерен аустеніту трансформуються у межі мартенситних пакетів. Одночасно забезпечується підвищена щільність дислокацій аустеніту, що переходять у мартенсит і формується дрібніша та більш рівномірна пакетно-рейкова структура.

У результаті мартенсит після ВТМО має вищу щільність дефектів кристалічної ґратки, але водночас більш рівномірний їх розподіл, що знижує локальні концентрації напружень.

Завдяки успадкуванню структури деформованого аустеніту сталь після ВТМО характеризується підвищеною міцністю за рахунок поєднання мартенситного та деформаційного зміцнення. Відповідно прогнозується покращення ударної в'язкості порівняно зі звичайною ТО та зниження ризику міжкристалітного крихкого руйнування. Також спостерігається зменшення чутливості до відпускнуї крихкості.

Після ВТМО в сталі AISI 420 формується дрібнопакетний відпущений мартенсит (рисунок 4.4), структура якого є результатом успадкування структури деформованого аустеніту, що забезпечує більш сприятливий баланс міцності та в'язкопластичних властивостей.

Після завершення деформації проводять інтенсивне охолодження, внаслідок чого реалізується мартенситне перетворення.

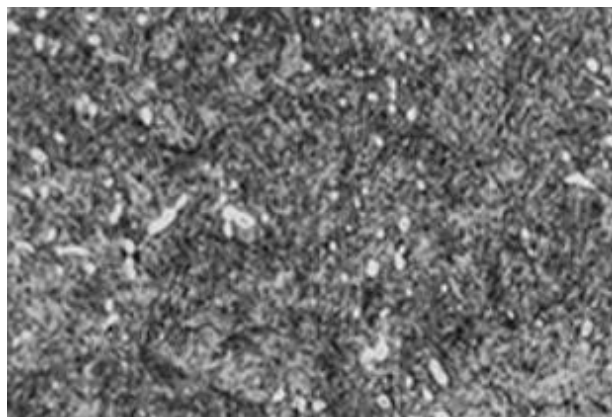


Рисунок 4.4 – Мікроструктура сталі AISI 420 після ВТМО та відпуску

У сталі AISI 420 після звичайної термічної обробки мартенситні пакети, як правило, є більшими, а їх орієнтаційна неоднорідність сприяє локалізації напружень. Після ВТМО така локалізація істотно зменшується, що безпосередньо впливає на механізм руйнування.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після гартування сталь піддають високому відпуску (620...700 °С). У цьому інтервалі температур відбувається стабілізація структури та зміни карбідної фази. У цьому температурному інтервалі характерне виділення карбідів типу $(Cr,Fe)_{23}C_6$. Інтенсивність цього процесу зростає за температур вище 550 °С. Карбіди набувають менших розмірів, не утворюють скупчень та розподілені більш рівномірно.

Одночасно з виділенням карбідів відбувається часткова релаксація внутрішніх напружень у мартенситі, проте збереження дрібнопакетної будови забезпечує високий рівень структурної однорідності.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ

Розглянуті структурні зміни, що відбуваються в сталі AISI 420 під впливом високотемпературної термомеханічної обробки, безпосередньо визначають рівень її механічних і експлуатаційних властивостей. Подрібнення мартенситних пакетів, успадкування структури деформованого аустеніту та більш рівномірний розподіл карбідної фази створюють передумови для зміни характеру руйнування та підвищення стійкості матеріалу до крихкого зламу. У зв'язку з цим доцільно перейти до аналізу впливу термічної та термомеханічної обробки на основні механічні властивості сталі AISI 420.

5.1. Вплив ВТМО на твердість сталі AISI 420 після ВТМО

Твердість сталі AISI 420 безпосередньо визначається її фазовим складом, дисперсністю структурних елементів і рівнем дефектності кристалічної ґратки, які формуються в процесі термічної та термомеханічної обробки.

У вихідному, відпаленому стані структура сталі AISI 420 представлена феритною матрицею з карбідними включеннями хрому. Ферит має об'ємно-центровану кубічну ґратку з низькою щільністю дислокацій, що зумовлює невисокі значення твердості. Карбіди у цьому стані мають обмежений зміцнювальний ефект, оскільки розміщені переважно по межах зерен і не створюють ефективного опору руху дислокацій у матриці.

Після загартування формується мартенситна структура, що характеризується тетрагонально спотвореною ґраткою, високою щільністю дислокацій і внутрішніх напружень. Саме перехід від феритної до мартенситної структури є основною причиною різкого зростання твердості сталі.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Подальший високий відпуск призводить до часткової релаксації напружень і виділення карбідів хрому, внаслідок чого твердість дещо зменшується, проте залишається значно вищою порівняно з вихідним станом. У цьому випадку твердість визначається поєднанням мартенситного зміцнення та карбідного дисперсійного зміцнення.

Застосування ВТМО призводить до додаткових структурних змін, які безпосередньо впливають на твердість сталі AISI 420. Гаряча деформація аустеніту формує розвинену структуру з високою щільністю дислокацій, яка частково зберігається після мартенситного перетворення.

В таблиці 5.1 приведено узагальнену характеристику змін структури, твердості і міцності сталі залежно від проведеного етапу термічної обробки.

Таблиця 5.1 – Вплив структурного стану на твердість і міцність сталі AISI 420

Структурний стан	Основні структурні особливості	Твердість, HRC	Межа міцності σ_B , МПа
Вихідний стан (відпал)	Ферит + карбіди Cr, неоднорідний розподіл	18...22	500...600
Гартування	Крупнопакетний мартенсит, високі внутрішні напруження	50...56	900...1050
Гартування + високий відпуск	Відпущений мартенсит + карбіди $(Cr, Fe)_{23}C_6$	35...45	700...850
ВТМО + гартування	Дрібнопакетний мартенсит,	48...54	950...1100
ВТМО + високий відпуск	Дрібнопакетний відпущений мартенсит, дисперсні карбіди	38...46	800...900

У результаті формується дрібнопакетний мартенсит з підвищеною дислокаційною щільністю. Така структура створює ефективні бар'єри для руху дислокацій, що забезпечує підвищення твердості порівняно зі станом після

звичайної термічної обробки. Додатково, під час відпуску після ВТМО, карбіди виділяються більш рівномірно та мають менші розміри, що посилює дисперсійне зміцнення без істотної втрати твердості.

Для своїх зразків було здійснено по 5 замірів для різних точок, вираховано середні значення, а результати приведено у таблиці 5.2, а на рисунку 5.1 відображено у вигляді гістограми.

Таблиця 5.2 – Результати вимірювання твердості сталі AISI 420

№ точки	До ТО (відпал), HRC	Після ТО, HRC	Після ВТМО, HRC
1	19,2	40,1	43,4
2	20,0	41,3	44,1
3	18,9	39,8	42,7
4	21,1	42,0	45,0
5	19,6	40,6	43,9

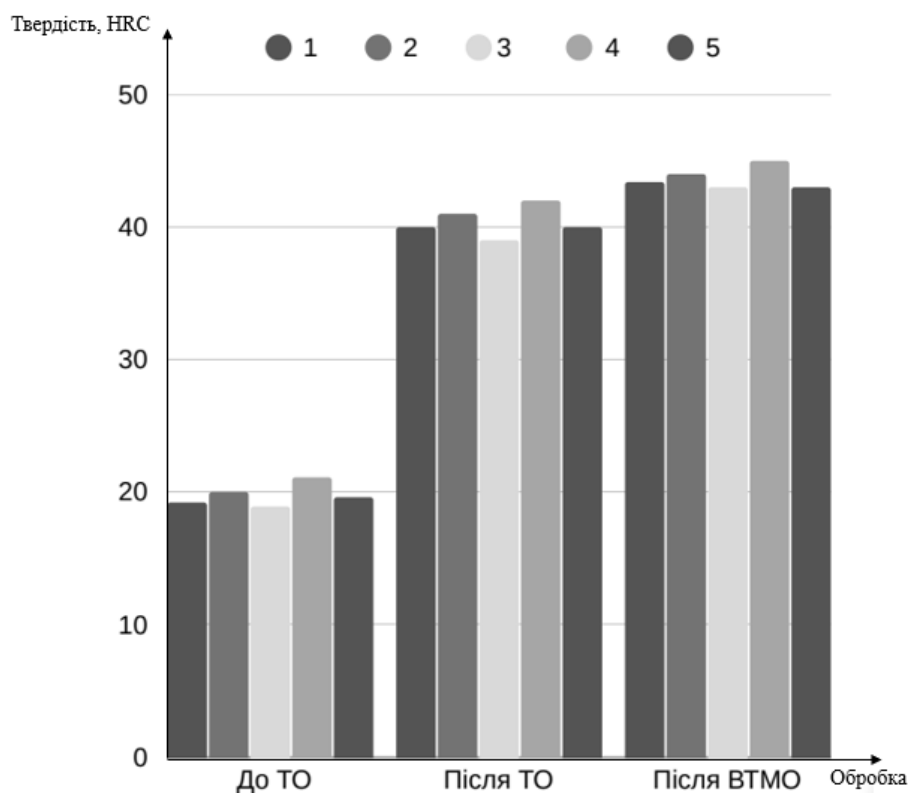


Рисунок 5.1 – Гістограма значень твердості сталі AISI 420

Підвищення твердості сталі AISI 420 при переході від вихідного стану до термічно та термомеханічно обробленого зумовлене послідовною зміною механізмів зміцнення: від обмеженого впливу карбідів у феритній матриці до домінування мартенситного, деформаційного та дисперсійного зміцнення. Найвищі та найбільш стабільні значення твердості досягаються після ВТМО, що безпосередньо пов'язано з подрібненням структурних елементів і успадкуванням структури деформованого аустеніту.

5.2. Аналіз ударної в'язкості сталі

Ударна в'язкість сталі AISI 420 є чутливим показником її структурного стану та визначається характером фазового складу, морфологією мартенситу, станом меж зерен і розподілом карбідної фази. На відміну від твердості чи межі міцності, ударна в'язкість найбільш повно відображає схильність матеріалу до крихкого руйнування та здатність поглинати енергію деформації перед зломом.

Для того щоб оцінити зміни ударної в'язкості досліджуваної сталі, можна порівняти зміни структури з її особливостями, оцінити характер та причини руйнування сталі AISI 420 та попередньо визначити ударну в'язкість (таблиця 5.3).

Ударна в'язкість сталі AISI 420 є чутливим показником її структурного стану та визначається характером фазового складу, морфологією мартенситу, станом меж зерен і розподілом карбідної фази. На відміну від твердості чи межі міцності, ударна в'язкість найбільш повно відображає схильність матеріалу до крихкого руйнування та здатність поглинати енергію деформації перед зломом.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Таблиця 5.3 – Вплив ВТМО на в'язкопластичні характеристики сталі AISI 420

Структурний стан	Характер руйнування	Ударна в'язкість КСУ	Структурні особливості
Гартування + відпуск (без ВТМО)	Змішаний, з ознаками міжкристалітного	Середня	Карбіди по межах зерен, більші пакети мартенситу
ВТМО + Гартування	Переважно транскристалітний	Вища за базову	Подрібнення пакетів, висока густина дислокацій
ВТМО + високий відпуск	Транскристалітний, в'язкий	Підвищена	Рівномірна карбідна фаза, зменшення локальних напружень

Ударна в'язкість сталі AISI 420 є чутливим показником її структурного стану та визначається характером фазового складу, морфологією мартенситу, станом меж зерен і розподілом карбідної фази. На відміну від твердості чи межі міцності, ударна в'язкість найбільш повно відображає схильність матеріалу до крихкого руйнування та здатність поглинати енергію деформації перед зломом.

Ударна в'язкість у вихідному стані є відносно високою, оскільки енергія удару витрачається на пластичну деформацію матриці та зародження мікротріщин. Руйнування має переважно в'язкий або в'язко-перехідний характер. Проте такий стан не забезпечує достатньої міцності та зносостійкості для експлуатаційних умов, що обмежує практичне застосування сталі без зміцнення.

Гартування з аустенітного стану у сталі AISI 420 формує мартенситну структурауз високою щільністю дислокацій і значними внутрішніми напруженнями. Ударна в'язкість різко зменшується. Руйнування в цьому стані має крихкий характер, що є типовим для загартованих мартенситних сталей.

Структурний стан після гартування є найбільш несприятливим з точки зору ударної в'язкості та вимагає обов'язкового подальшого відпуску. Високий відпуск призводить до часткової релаксації внутрішніх напружень і виділення карбідів хрому з мартенситної матриці. Ударна в'язкість після відпуску помітно

зростає порівняно зі станом після загартування, проте залишається нижчою, ніж у вихідному відпаленому стані. Це пов'язано з тим, що мартенситна структура, навіть відпущена, зберігає обмежену здатність до пластичної деформації. Негативним фактором для високохромистих сталей є можливість формування карбідів по межах зерен, що за певних режимів відпуску може зумовлювати схильність до міжкристалітного руйнування та зниження ударної в'язкості.

Застосування VTMO суттєво змінює характер структурної перебудови сталі AISI 420 і механізми руйнування при ударному навантаженні. Ударна в'язкість у цьому стані дуже перевищує значення після звичайної термічної обробки, хоча й не досягає рівня відпаленого стану. Руйнування набуває переважно транскристалітного або в'язко-змішаного характеру, що свідчить про підвищену здатність матеріалу до поглинання енергії удару.

За результатами проведених досліджень подано узагальнення на рисунку 5.2.

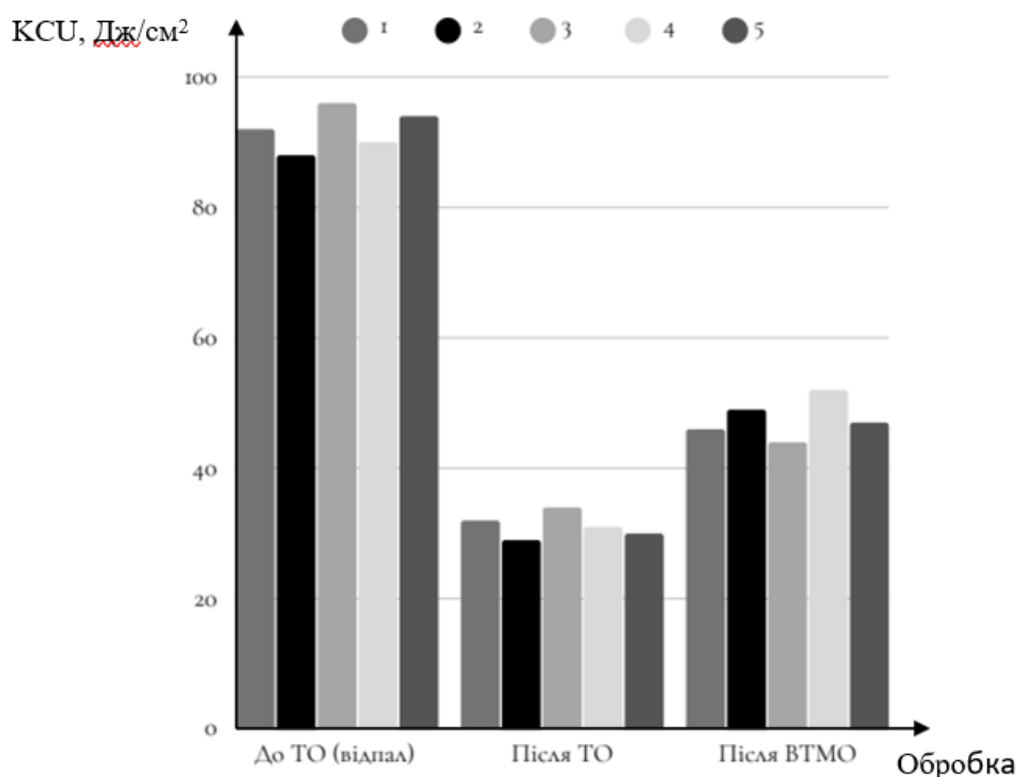


Рисунок 5.2 – Ударна в'язкість сталі AISI 420

Найвищі значення КСУ спостерігаються у вихідному відпаленому стані, проте вони поєднуються з низькою міцністю. Гартування забезпечує максимальну міцність, але різко знижує ударну в'язкість. Компроміс між цими властивостями досягається шляхом відпуску, а найбільш сприятливе поєднання міцності та в'язкості забезпечується застосуванням високотемпературної термомеханічної обробки, яка структурно обґрунтовано зменшує схильність сталі до крихкого руйнування.

5.3. Формування міцнісних характеристик сталі AISI 420

Межа міцності сталі AISI 420 сильно залежить від її структурного стану, який формується в процесі термічної та термомеханічної обробки. У вихідному, відпаленому стані структура сталі представлена феритною матрицею з карбідними включеннями, що зумовлює порівняно низькі значення межі міцності внаслідок обмеженого опору пластичній деформації.

Після загартування зі стану аустеніту формується мартенситна структура з високою щільністю дислокацій і внутрішніх напружень, що приводить до різкого зростання межі міцності. Однак у цьому стані матеріал характеризується підвищеною крихкістю, що обмежує його практичне застосування без подальшого відпуску.

Високий відпуск після загартування сприяє частковій релаксації напружень і стабілізації мартенситної структури, внаслідок чого межа міцності дещо знижується, але залишається значно вищою порівняно з відпаленим станом. Застосування високотемпературної термомеханічної обробки додатково підвищує межу міцності за рахунок подрібнення мартенситних пакетів і спадкування структури деформованого аустеніту, забезпечуючи більш стабільні та однорідні значення цього показника.

Після високотемпературної термомеханічної обробки межа міцності сталі AISI 420 зростає порівняно зі станом після звичайної термічної обробки та

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

характеризується більш стабільними значеннями. Це зумовлено поєднанням кількох структурних чинників: подрібненням мартенситних пакетів, підвищеною щільністю дислокацій унаслідок спадкування деформаційної структури аустеніту та більш рівномірним розподілом карбідної фази після відпуску.

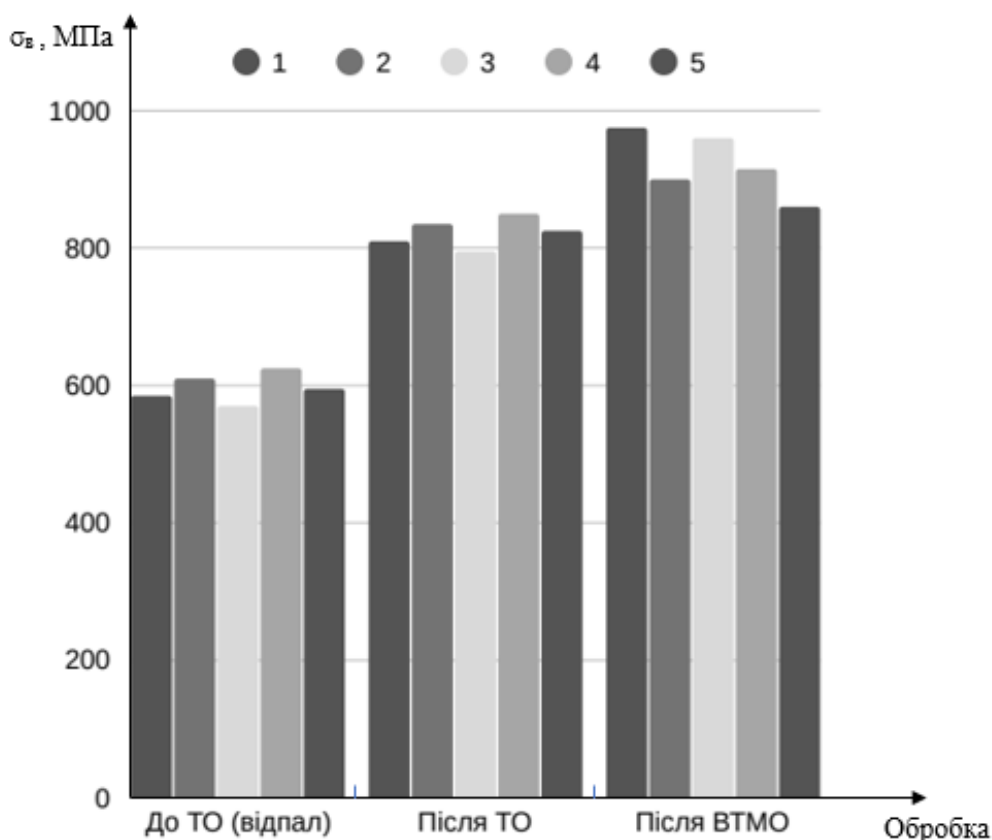


Рисунок 5.3 – Гістограма зміни міцності сталі AISI 420 залежно від типу ТО

Так реалізується сумарний ефект мартенситного, деформаційного та дисперсійного зміцнення, що забезпечує підвищення межі міцності без різкого зниження пластичності. Саме після ВТМО досягається найбільш сприятливий баланс між високою міцністю та експлуатаційною надійністю сталі.

ВИСНОВКИ

У ході аналізу впливу термічної та високотемпературної термомеханічної обробки на структуру і властивості сталі AISI 420 встановлено, що експлуатаційні характеристики цього матеріалу визначаються насамперед морфологією мартенситної структури та станом карбідної фази.

Звичайна термічна обробка (загартування з наступним високим відпуском) забезпечує формування відпущеного мартенситу та суттєве підвищення твердості й межі міцності порівняно з вихідним відпаленим станом. Водночас така структура може зберігати підвищену схильність до крихкого руйнування, що проявляється у зниженні ударної в'язкості.

Застосування високотемпературної термомеханічної обробки приводить до перебудови мікроструктури сталі. Деформація аустеніту перед загартуванням сприяє подрібненню аустенітного зерна та формуванню розвиненої структури, яка спадкується мартенситом. У результаті формується дрібнопакетний відпущений мартенсит із більш рівномірним розподілом карбідів хрому.

Такі структурні особливості зумовлюють більш сприятливе поєднання механічних властивостей: підвищення межі міцності та твердості при одночасному зростанні ударної в'язкості порівняно зі станом після звичайної термічної обробки. Отриманий баланс властивостей свідчить про зменшення схильності сталі до крихкого руйнування та підвищення її експлуатаційної надійності.

Для виробів зі сталі AISI 420, що працюють в умовах інтенсивного зношування без значних динамічних навантажень, доцільним є застосування класичної термічної обробки, яка забезпечує високі значення твердості та міцності за відносно простої технологічної реалізації.

Для відповідальних деталей, що експлуатуються за умов ударних або змінних навантажень, а також за наявності вимог до підвищеної надійності та опору крихкому руйнуванню, рекомендовано застосовувати

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високотемпературну термомеханічну обробку. ВТМО дозволяє оптимізувати мікроструктуру сталі за рахунок подрібнення мартенситних пакетів і формування стабільної карбідної фази, що особливо важливо для деталей машин, інструментів і елементів енергетичного та насосного обладнання.

З технологічної точки зору впровадження ВТМО у виробництво є доцільним насамперед у тих випадках, коли застосовується гаряча пластична деформація (прокатка, кування), оскільки це дозволяє поєднати процеси формоутворення та зміцнення без істотного ускладнення виробничого циклу.

Таким чином, вибір між традиційною термічною обробкою та ВТМО для сталі AISI 420 повинен базуватися на вимогах до експлуатаційних властивостей виробу, причому високотемпературна термомеханічна обробка є перспективним напрямом підвищення конкурентоспроможності виробів за рахунок покращення їх структурної стабільності та довговічності.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jiang, W., Wu, D., Zhang, Q., Li, M., & Liu, W. (2024). Effect of Tempering Time on the Microstructure and Properties of Martensitic Stainless Steel. *Metals*, 14(3), 322. <https://doi.org/10.3390/met14030322>.

2. https://sciendo.com/2/v2/download/article/10.2478/adms-2025-0006.pdf?utm_source=chatgpt.com.

3. Gopal, M. (2021). Experimental Investigation of Duplex Stainless Steel Using RSM and Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA). In: Mohan, S., Shankar, S., Rajeshkumar, G. (eds) *Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9809-8_59.

4. Ubaldini, A., Telloi, C., Rizzo, A., Gessi, A., Marghella, G., Bruni, S., Calistri, S., Gennerini, F., & Pintilei, G. (2024). A Study of Accelerated Corrosion of Stainless Steels under Highly Oxidizing Conditions. *Coatings*, 14(4), 390. <https://doi.org/10.3390/coatings14040390>.

5. Callister W. D., Rethwisch D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2021.

6. <https://westa.kiev.ua/ua/ferritnye-nerzhavayushchie-stali-cto-eto-takoe-i-osnovnye-marki-takih-stalej/>

7. https://nmetau.edu.ua/file/legirovannye_stali_i_splavy_s_osobymi_svoystvami.pdf.

8. <https://ferro.com.ua/uk/products-ua/duplex-stainless-steels-ua/>.

9. https://worldstainless.org/wp-content/uploads/2021/11/ISSF_Duplex_Stainless_Steels.pdf.

10. Simo Olavi Pehkonen, Shaojun Yuan, Chapter 2 - Self-Assembly Ultrathin Film Coatings for the Mitigation of Corrosion: General Considerations, Editor(s): Simo Olavi Pehkonen, Shaojun Yuan, *Interface Science and Technology*, Elsevier, Volume 23, 2018, Pages 13-21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813584-6.00002-8>.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

11. Developing the Microstructure and Mechanical Characteristics of 410 Martensitic Stainless Steel During Cold Drawing of Pipes M. M. NiaziR. VafaeiE. Mohammad SharifiA. Mahdian. Metal Science and Heat Treatment 66, 722 (2025).

12. https://www.ssina.com/education/corrosion/intergranular-corrosion/?utm_source=chatgpt.com.

13. Parker, M.E., Horton, D.J. & Wahl, K.J. Tribocorrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in Sodium Chloride and Sodium Sulfate Environments. Tribol Lett 70, 70 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01601-7>.

14. <https://dl.asminternational.org/technical-books/monograph/99/Practical-Heat-Treating>.

15. Lupyr O., Hovorun T., Vorobiov S., Burlaka A., Khvostenko R. (2020). Influence of heat treatment technologies on the structure and properties of the corrosion-resistant martensitic steel type AISI 420. Journal of Engineering Sciences, Vol. 7(2), pp. C10–C16, doi: 10.21272/jes.2020.7(2).c2.

16. Bo Gao. Achieving a superior combination of tensile properties and corrosion resistance in AISI420 martensitic stainless steel by low-temperature tempering. Tao Xu, Li Wang, Yi Liu, Junliang Liu, Yaping Zhang, Yudong Sui, Wenwen Sun, Xuefei Chen, Xiaofeng Li, Lirong Xiao, Hao Zhou. Corrosion Science: Volume 225, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111551>.

17. https://en.wikipedia.org/wiki/Intergranular_corrosion?utm_source.

18. Davydov, A., Alekseeva, E., Kolnyshenko, V., Strekalovskaya, D., Shvetsov, O., Devyaterikova, N., Laev, K., & Alkhimenko, A. (2023). Corrosion Resistance of 13Cr Steels. *Metals*, 13(11), 1805. <https://doi.org/10.3390/met13111805>

19. Feng Yuan, Gaoyang Wei, Shurui Gao, Siyuan Lu, Hengsan Liu, Shuxin Li, Xufei Fang, Yunbo Chen, Tuning the pitting performance of a Cr-13 type martensitic stainless steel by tempering time, Corrosion Science, Volume 203, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110346>.

20. <https://atlassteels.com.au/wp-content/uploads/2021/09/Stainless-Steel-420-Grade-Data-Sheet-28-04-21-1.pdf>

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

21. Candelária, A.F., Pinedo, C.E. Influence of the heat treatment on the corrosion resistance of the martensitic stainless steel type AISI 420. Journal of Materials Science Letters **22**, 1151–1153 (2003).

<https://doi.org/10.1023/A:1025179128333>

22. ASTM E407–23. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2023.

23. ISO 643:2024. Steels — Micrographic determination of the apparent grain size. Geneva : International Organization for Standardization, 2024

24. ISO 148-1:2023. Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 1: Test method. Geneva : International Organization for Standardization, 2023.

25. ISO 6892-1:2023. Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature. Geneva : International Organization for Standardization, 2023.

26. ISO 6508-1:2023. Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 1: Test method. Geneva : International Organization for Standardization, 2023.

					MP 1825.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59