

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра фізичного матеріалознавства
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему: «Використання азоту в економнолегованих швидкорізальних сталях»

(назва теми)

Виконав: студент(ка) II курсу, групи
Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

Антипов А.А.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник: Глотка О.А.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент: _____
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет

Кафедра Фізичне матеріалознавство

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 132 Матеріалознавство

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

_____ Антипов Анатолій Анатолійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Використання азоту в економнолегованих швидкорізальних сталях

керівник проекту (роботи) ГЛОТКА Олександр Анатолійович, доц., к.т.н.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «_____» _____ 2023

року

2 Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3 Вихідні дані до проекту (роботи):

Механічні властивості та хімічний склад швидкорізальної сталі. Дані щодо впливу легування швидкорізальних сталей на їх мікроструктуру та властивості.

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

Аналіз використання швидкорізальних сталей; матеріали та методи дослідження; визначення структурних та механічних характеристик сталі після різних видів термічного оброблення; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; розрахунок економічної ефективності.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів):

кількість слайдів – 7, з них: титульний лист – 1; Таблиці з даними про фізико-механічні характеристики – 3; Макро- та мікроструктура зразків – 3.

6 Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	ГЛОТКА О.А., доц., к.т.н.		
2	ГЛОТКА О.А., доц., к.т.н.		
3	ГЛОТКА О.А., доц., к.т.н.		
4	НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н		
5	КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н		
НК			

7 Дата видачі завдання «25» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Ознайомлення із темою дипломної роботи. Вивчення відповідної літератури	06.10.2023	
2	Розробка вступу та розділу «Огляд літературних джерел»	13.10.2023	
3	Розробка розділу «Матеріали та методи дослідження»	20.10.2023	
4	Розробка розділу «Визначення структурних та механічних характеристик сталі після різних видів термічного оброблення»	27.10.2023	
5	Розробка розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	03.11.2023	
6	Розробка розділу «Економіко-організаційна частина»	10.11.2023	
7	Написання висновків та переліку посилань	17.11.2023	
8	Оформлення дипломної роботи	24.11.2023	

Студент _____ / Антипов А.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ / Глотка О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 80 с, 20 табл, 9 рис, 1 додаток, 22 джерела.

У роботі проаналізовано вплив легування азотом на мікроструктуру та властивості економнолегованої швидкорізальної сталі Р2АМЗФЗБТ.

Проведено огляд літературних даних стосовно застосування азоту для легування швидкорізальних сталей. Встановлено позитивний вплив додавання 0,01-0,1 % N на подрібнення зерен, підвищення дисперсності карбідів та механічних характеристик сталей.

Досліджено вплив легування 0,02 % N на структуру та властивості сталі Р2АМЗФЗБТ порівняно зі сталлю Р6М5. Показано, що азот забезпечує формування дрібнішого аустенітного зерна та менший розмір карбідів.

Визначено, що сталь Р2АМЗФЗБТ з 0,02 % N демонструє вищу на 1,5-2 HRC твердість та на 5-10 % менший вміст залишкового аустеніту після термообробки порівняно з Р6М5. Характеристики міцності та пластичності азотовмісної сталі не поступаються рівням Р6М5.

Проведено економічний аналіз, який показав, що вартість виробництва сталі Р2АМЗФЗБТ на 21 % нижча за Р6М5. Це забезпечує економічний ефект близько 8 млн грн за 5 років.

Встановлено оптимальний вміст азоту на рівні 0,02 %, що забезпечує найкраще поєднання структури та властивостей сталі Р2АМЗФЗБТ. Доведено можливість створення ефективного аналога сталі Р6М5 на основі азотовмісної сталі Р2АМЗФЗБТ.

Результати дослідження створюють передумови для розробки нового типу економічно вигідної азотованої швидкорізальної сталі з високими експлуатаційними характеристиками.

ШВИДКОРІЗАЛЬНА СТАЛЬ, АЗОТ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЛЕГУВАННЯ, ТВЕРДІСТЬ, ЧЕРВОНОСТІЙКІСТЬ, МІКРОСТРУКТУРА, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Об'єкт дослідження – мікроструктура і властивості економнолегованої швидкорізальної сталі Р2АМЗФЗБТ.

Предмет дослідження – закономірності впливу легування азотом в кількості 0,01-0,1 % на мікроструктуру та комплекс фізико-механічних властивостей швидкорізальної сталі Р2АМЗФЗБТ.

Мета роботи – встановити закономірності впливу азоту на структуроутворення, фазовий склад, мікротвердість, межу міцності та пластичність економнолегованої швидкорізальної сталі Р2АМЗФЗБТ.

Методи дослідження – металографічний аналіз для вивчення мікроструктури; рентгеноструктурний аналіз для визначення фазового складу; вимірювання мікротвердості методом вдавлювання алмазної піраміди; випробування на розтяг для визначення міцності та пластичності; економічний аналіз витрат на виробництво та оцінка ефективності.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення складу і методології виготовлення швидкорізальних сталей, що сприятиме підвищенню їх експлуатаційних характеристик.

Значимість роботи та висновки – внесення азоту як легувального елемента сприяє підвищенню твердості та покращенню червоностійкості у економічно вигідних швидкорізальних сталях. Також було підтверджено, що використання цієї інноваційної сталі є економічно вигідним.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	8
1 Огляд літературних джерел.....	9
1.1 Огляд властивостей швидкорізальних сталей.....	9
1.2 Вплив легувальних елементів на характеристики та мікроструктуру швидкорізальних сталей.....	11
1.3 Вплив азоту на структуру та властивості швидкорізальної сталі...	19
1.4 Постановка мета та задач дослідження.....	23
2 Матеріали та методи дослідження.....	25
2.1 Проведення дослідних плавок та термічної обробки.....	25
2.2. Переробка виливків.....	26
2.3 Процедура виготовлення зразків для мікроструктурного аналізу...	27
2.4 Оцінка механічних характеристик матеріалів.....	29
2.5 Механізм функціонування растрового електронного мікроскопа..	30
3 Визначення структурних та механічних характеристик сталі після різних видів термічного оброблення.....	33
3.1 Морфологія литих сталей.....	33
3.2 Аналіз характеру карбідних фаз.....	34
3.3 Властивості сталі у відпаленому стані.....	35
3.4 Характеристики сталі після гартування.....	37
3.5 Властивості сталі після відпуску.....	40
3.6 Висновки за розділом 3.....	42
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	44
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	44
4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці та пожежної безпеки.....	46
4.2.1 Захист працівників у робочій зоні.....	46

4.2.2 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці.....	48
4.2.3 Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження.....	50
4.2.4 Заходи з пожежної безпеки.....	52
5 Економіко-організаційна частина.....	54
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	54
5.2 Послідовний аналіз собівартості виконання науково-дослідної роботи.....	56
5.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження результатів НДР.....	64
5.4 Висновки за розділом 5.....	67
Висновки.....	69
Перелік джерел посилання.....	71
Додаток А	

ВСТУП

У зв'язку з неперервним розвитком технологій, впровадженням високопродуктивних машин та появою новітніх складно оброблюваних матеріалів, спостерігається суттєве зростання вимог до зносостійкості та функціональності різального інструменту. Якість та довговічність інструментів, що використовуються у стандартному та автоматизованому обладнанні, безпосередньо впливає на ефективність виробничих процесів. Це, в свою чергу, впливає на вартість кінцевої продукції, оскільки частота обслуговування та заміна інструментів визначається їх зносостійкістю.

У контексті зменшення доступності ключових легувальних елементів, таких як вольфрам, молібден, кобальт, та ванадій, постає питання економії ресурсів при виробництві швидкорізальних сталей. Це стимулює пошуки альтернатив традиційній сталі Р6М5, яка застосовується для обробки звичайними швидкостями різання вуглецевих і помірно легованих конструкційних сталей та нержавіючих сталей.

На ринку існують малолеговані швидкорізальні сталі типу Р3М3Ф2, які доступні у лімітованих кількостях і, як правило, не дотягують до параметрів сталі Р6М5, забезпечуючи лише близько 80% її ефективності.

Легування азотом сприяє підвищенню вторинної твердості, червоностійкості та зносостійкості. Процес легування азотом є найбільш результативним, коли відбувається паралельне зростання масової частки вуглецю у складі сталі.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Огляд властивостей швидкорізальних сталей

Швидкорізальні сталі становлять основу для більшості інструментальних матеріалів, оскільки до 60% всіх різальних інструментів виробляють з цього типу сталей. Під час різального процесу відзначається значне тепловиділення і високі контактні напруги, що спричиняються інтенсивним тертям між інструментом, оброблюваним матеріалом та утвореною стружкою, що призводить до зносу інструменту.

У зоні різання, під впливом контактних навантажень і високих температур, спостерігаються адгезійні явища, які виявляються у "зближенні" матеріалу інструменту і стружки, що призводить до відриву часток матеріалу інструменту стружкою та прискореного зношування.

Під час обробки матеріалів без використання мастильно-охолоджувальних рідин основним механізмом зносу стає абразивний знос. Ці обставини спричиняють зношування різальних кромek інструментів як по передній, так і по задній поверхнях.

Міра та характеристика зношування різального інструменту мають прямий вплив на витрати інструменту, якість обробленої поверхні та точність розмірів вироблених деталей. Робочі частини інструментів зі швидкорізальних сталей функціонують у середовищі екстремально високих температур і піддаються інтенсивним статичним та динамічним навантаженням. Такі обставини вимагають від інструментальних матеріалів володіння комплексом характеристик, до яких входять твердість, границя міцності, зносостійкість, теплова стабільність та теплопровідність.

Твердість, що визначає здатність матеріалу протистояти проникненню іншого твердого тіла, є ключовою для можливості ріжучого інструменту ефективно відокремлювати стружку від оброблюваної поверхні. Водночас, в'язкість, яка вказує на здатність матеріалу протистояти динамічним ударним

навантаженням, також є важливою властивістю, оскільки вона визначає здатність інструменту витримувати удари та різкі зміни навантажень під час різання.

Міцність визначає здатність матеріалу протидіяти зовнішнім навантаженням, таким як розтягнення, згин, стиск чи крутіння. Ця властивість є вирішальною для підтримання інтегральності інструменту під час його застосування.

Зносостійкість, яка вказує на здатність матеріалу протистояти зносу, безпосередньо впливає на тривалість функціонування різального інструменту, зберігаючи його різальні характеристики та розміри протягом більш тривалого періоду часу.

Термічна стійкість описує здатність матеріалу підтримувати свої властивості, в тому числі твердість, при підвищених температурах, що є критично важливим для високопродуктивних різальних процесів.

Теплопровідність матеріалу, що сприяє відведенню тепла від зони різання, знижує температуру робочого середовища інструменту, тим самим сприяючи кращим умовам його роботи та збільшенню терміну служби [1-3].

Сталі, що використовуються для виготовлення різальних інструментів, зазвичай відзначаються наступними характеристиками:

- Висока твердість є ключовою, з показниками зазвичай у межах 63...66 HRC. Особливо це стає актуальним при роботі з матеріалами, що важко обробляються, де твердість може досягати 66...69 HRC. Важливим є також доведення різальних кромek до необхідної твердості особливо в зонах, де вони піддаються підвищеним навантаженням. Висока твердість, але лише у поверхневому шарі, яка досягається через процеси ціанування чи азотування, є бажаною також для інструментів, призначених для різання конструкційних сталей та чавунів.

- Висока границя міцності та стійкість до малих і пластичних деформацій, а також підвищена в'язкість, яка може бути предметом важливості для окремих видів інструментів.

- Термічна стійкість, яка стає чинником особливої ваги при високошвидкісному різанні чи обробці матеріалів, що відносяться до категорії важкооброблюваних [4].

1.2 Вплив легувальних елементів на характеристики та мікроструктуру швидкорізальних сталей

Швидкорізальні сталі відзначаються особливою термічною стабільністю, званою червоностійкістю, яка полягає у здатності зберігати мартенситну структуру, а також високу твердість, границю міцності та зносостійкість за умов підвищених температур. Ці температурні умови типові для ріжучої кромки інструментів під час високошвидкісної обробки металів. Швидкорізальні сталі здатні підтримувати мартенситну структуру при температурах в діапазоні 600...620 °С, що сприяє значному підвищенню швидкості різання – у два до чотирьох разів, а також стійкості різальних інструментів – у десять до тридцяти разів у порівнянні зі сталями, що не мають такої теплостійкості.

Найважливішими легувальними елементами, які забезпечують вищезазначену термічну стабільність швидкорізальних сталей, є вольфрам та його хімічний еквівалент молібден. Присутність ванадію та кобальту також сприяє підвищенню теплостійкості цих матеріалів.

Швидкорізальні сталі досягають високих обробних характеристик завдяки винятковій теплостійкості, яка зберігається при високій твердості та зносостійкості. Ці властивості стають можливими завдяки додаванню легувальних елементів та складної термічної обробки, забезпечуючи

особливий фазовий склад 25]. Основними легувальними елементами у цих сталях є вуглець, вольфрам, молібден, ванадій та хром. У певних температурно-часових умовах ці елементи сприяють утворенню в сталі карбідних часток, що слугують матеріалу як зміцнююча фаза [6].

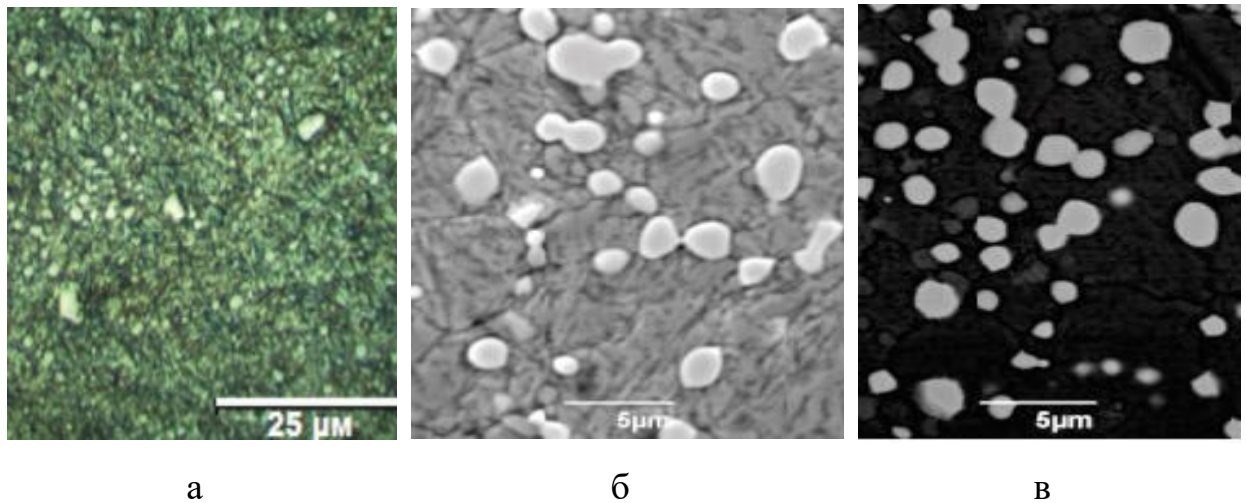
Відпуск, проведений після гартування в температурних рамках, призначених для різальних інструментів, веде до зменшення вмісту вуглецю у мартенситі та до формування ультрамікроскопічних карбідів [2]. Ці карбіди відіграють ключову роль у механічних характеристиках сталі, зокрема у твердості, зносостійкості та теплостійкості [3].

Швидкорізальні сталі класифікуються як карбідні, а точніше, ледебуритного типу. У відпаленому стані ці сталі містять у своїй структурі легований ферит та карбіди типів M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C . Примітно, що домінуючий карбід у складі швидкорізальних сталей – це M_6C , який, крім іншого, є розчином для ванадію. Хром в основному розчинений у фериті, тоді як більшість вольфраму (чи молібдену) та ванадію присутні у формі карбідів.

Мікроструктура швидкорізальної сталі Р6М5 після процесу гартування та триразового відпуску складатися з пластинчастого мартенситу відпуску і специфічних карбідів (рис. 1.1, а). Карбідні частинки розміщені рівномірно в матриці і мають форму, що наближається до ідеальної сфери, із діаметром не більше 3 мкм. На рис. 1.1, б представлено мікроструктуру, зафіксовану за допомогою детектора вторинних електронів, де частки карбідів мають розміри від 0,5 до 1,1 мкм. Матриця складається з мартенситу відпуску без залишкового аустеніту.

На рис. 1.1, в показана мікроструктура, отримана з використанням детектора обратного розсіяння (БСД). Двома видимими типами карбідів у цьому режимі є дуже яскраві карбіди, що містять елементи із вищим атомним номером, а також сірі карбіди з елементами із нижчим атомним номером. Ясно видно, що мартенсит є основною фазою і що сферичні карбідні частинки займають значну частку об'єму. Використовуючи програмне забезпечення для

аналізу зображень, об'ємна частка кожної фракції була оцінена з похибкою в межах $10,4 \pm 0,6 \%$ і $2,3 \pm 0,4 \%$ для світлих і сірих карбідів відповідно.



а – зображення по світловому мікроскопу; б – зображення по вторинним електронам; в – зображення по зворотньо розсіяним електронам

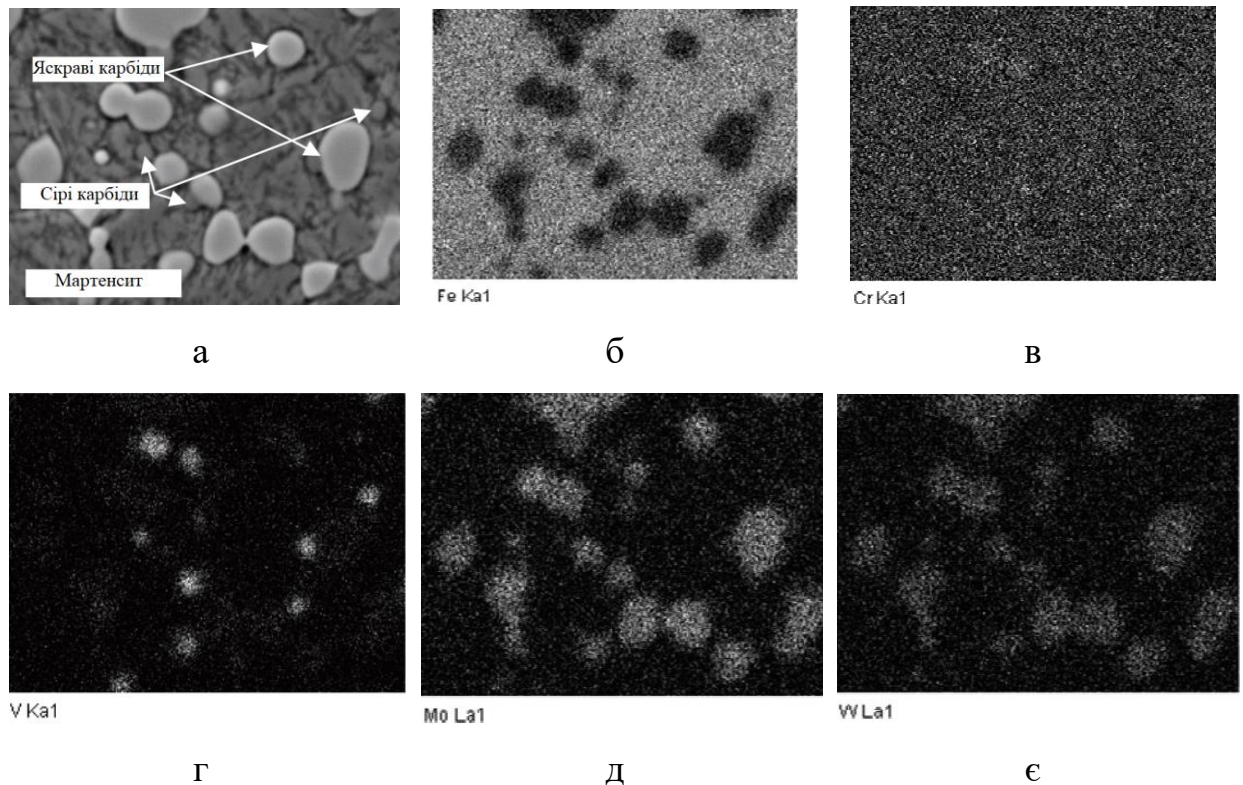
Рисунок 1.1 – Мікроструктура поверхні сталі Р6М5 [7]

Карта розподілу легувальних елементів у структурі сталі Р6М5 представлена на рис. 1.2. Згідно із даними статистичного аналізу, розміри часток світлих карбідів в мікроструктурі сталі Р6М5 становлять від 0,4 до 3 мкм, тоді як розміри часток сірих карбідів є меншими. V, W, Mo, і Cr є карбідоутворюючими елементами, які мають високу енергію зв'язку і стабільність. Саме тому більша кількість легувальних елементів знаходиться в карбідах, а не в твердому розчині.

Розглянемо вплив ключових легувальних елементів на характеристики характерних швидкорізальних сталей.

Специфічність впливу вольфраму на властивості цих сталей полягає у таких змінах: уже при вмісті вольфраму на рівні 7-8 %, сталі набувають задовільної вторинної твердості та теплостійкості. Однак, у карбідних фазах спостерігається підвищений вміст карбіду $M_{23}C_6$ на фоні недостатньої

кількості M_6C , що під час гартування призводить до формування грубого зерна та істотного зниження міцності та пластичності матеріалу.



а – основне зображення; б – лінія Fe Kα; в – лінія Cr Kα; г – лінія V Kα; д – лінія Mo Kα; є – лінія W Kα

Рисунок 1.2 – Мікроструктура поверхні та карта розподілу легувальних елементів в сталі P6M5 [7]

Підвищення концентрації вольфраму до 12-13 % веде до збільшення частки карбідів M_6C , що значно підвищує опірність сталей до перегріву. Проте, слід зазначити, що при цьому параметр кристалічної ґратки карбіду, а також його хімічний склад, залишаються незмінними. Подальше зростання вмісту вольфраму до 18-20 % викликає різке збільшення параметра ґратки карбіду MC , що свідчить про зростання концентрації вольфраму у карбідній структурі. Це, в свою чергу, призводить до утворення вакансій у ґратці, які заповнюються атомами вольфраму, підсилюючи властивості сталі.

Зі зростанням рівня вольфраму у складі спостерігається відповідна зміна концентрації ванадію в твердому розчині. При нарощуванні вмісту вольфраму з 6 до 13 %, концентрація ванадію в структурі майже подвоюється, оскільки відбувається розчинення значної кількості карбідів M_6C , що містять ванадій. При подальшому збільшенні вольфраму спостерігається зниження концентрації ванадію в мартенситі, що зумовлено зменшенням його присутності у карбіді M_6C та міграцією частини ванадію до карбиду MC .

Ці зміни хімічного складу мартенситу безпосередньо впливають на теплостійкість і динаміку процесу твердіння. Незважаючи на те, що інтенсивність твердіння залишається однаковою у сталей з вмістом вольфраму від 12 до 20 %, вона варіюється в залежності від концентрації легувальних елементів в мартенситі. Сталі з 12-13 % вольфраму проявляють більшу інтенсивність твердіння через вищу концентрацію ванадію, тоді як при 18-20 % вольфраму, аналогічний ефект обумовлений збільшенням вмісту самого вольфраму [8].

Вплив на структурні зміни та ключові властивості з боку молібдену та вольфраму, які є хімічними аналогами, майже ідентичний. Втім, температурні показники $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -переходу для сталей, що містять молібден, є дещо нижчими порівняно зі сталями на основі вольфраму.

Під час кристалізації δ - (γ -) фази, як для молібденових, так і для вольфрамових сталей, відбувається периктектична реакція. Однак, для молібденових сталей характерна ширша температурна зона цього переходу, що дозволяє його відбуватися більш повно. Це призводить до зменшення обсягу рідкої фази до завершення перетворення. У тих ділянках, де рідка фаза залишилась, вона кристалізується при нижчих температурах, приблизно на 50°C нижче, утворюючи тоншу евтектику. Внаслідок цього, у деформованій молібденовій сталі спостерігається висока дисперсія карбідів, що позитивно впливає на механічні властивості матеріалу.

Молібден відіграє ключову роль у складі швидкорізальних сталей, зазвичай знаходячись у концентрації від 0,3 до 1,0 %. Його використання є

результатом додавання у шихту як відходів сталей, що містять вольфрам і молібден, так і феро-вольфраму з молібденом. Наявність молібдену сприяє поліпшенню характеристик сталей, зокрема збільшенню ударної в'язкості на 15-20 % та міцності на 5-8 %, не впливаючи при цьому на теплостійкість [9].

Температурний поріг $\alpha \rightarrow \gamma$ переходу у сталях, збагачених молібденом, лежить трохи нижче порігу, характерного для сталей на вольфрамовій основі.

Масова частка карбідної фази у сталях з вольфрамом та молібденом збігається. У процентному співвідношенні вона нижча у вольфрамових сталях через меншу густину цього елемента. Так, після процесу відпалу зафіксовано, що у сталі Р6М5 цей показник складає 22%.

За своїм впливом на теплостійкість, молібден функціонує як замітник вольфраму в співвідношенні Мо до W, що становить 1 до (1,4...1,5), враховуючи кількість обох елементів, потрібну для формування M_6C карбиду (Fe_4M_2C), який є основою карбідної фази у цих сталях.

Утворення евтектики відбувається при температурі 1275 °C у разі сталі, що містить 5 % молібдену та 6 % вольфраму. Від цього впливає, що температури для гартування сталей з молібденом мають бути нижчі порівняно з тими, що застосовуються для сталей з вольфрамом [10].

Хром, як невід'ємний легувальний елемент у складі швидкорізальних інструментальних сталей, як у середньолегованих, так і у високолегованих, має багатогранний та складний вплив. Він присутній у фериті, в карбідах M_6C , а також формує карбід $M_{23}C_6$ у відпаленій швидкорізальній сталі. Останній легко розчиняється при відносно низьких температурах гарту, сприяючи збагаченню твердого розчину вуглецем та хромом без зміни розміру зерна. Хром, зокрема при концентрації 3,5...4,0 %, сприяє оптимальному розчиненню карбиду M_6C в аустеніті, що забезпечує необхідні характеристики звгартованості та прогартованості.

Карбідна гетерогенність зміцнюється за рахунок хрому, і варто зазначити, що вплив одного відсотка хрому є порівнянним з ефектом 3,0-4,0 % вольфраму через меншу атомну масу хрому. Тому вміст хрому потрібно

коригувати відповідно до присутності вольфраму у сплаві. Наприклад, в сталі, що містить 18 % вольфраму та від 0,7 % до 1,0 % ванадію, бажані рівні прогартованості та загартованості досягаються коли концентрація хрому становить між 3,8 % та 4,4 %. У той час як сталь з 12-13 % вольфраму вимагає меншої кількості хрому, від 3,2 % до 3,6 %, адже вона містить менше карбідів M_6C , які включають хром. Цікаво, що менший вміст вольфраму в карбідах M_6C у сплаві з 12 % вольфраму сприяє їх розчиненню під час нагріву перед гартуванням [11].

Ванадію, який у типових сталях P18, P12, P6M5 та інших знаходиться на рівні до 1,8-1,9 %, сприяє формуванню лише незначної кількості карбиду MC , головним чином знаходячись у карбідах $M_{23}C_6$ та M_6C . Під час нагріву сталі перед гартуванням, ванадій, що міститься у цих карбідах, переходить у γ -фазу. В процесі відпуску ванадій кристалізується у вигляді карбиду MC , що покращує шліфувальні властивості загартованої сталі порівняно з відпущеною, збільшуючи вторинну твердість та термічну стійкість, однак це може знижувати ударну в'язкість.

Підвищення концентрації ванадію до 4,0-5,0 % призводить до значного зростання кількості карбиду типу MC , яке сприяє збільшенню зносостійкості сталі. Водночас, це негативно позначається на таких характеристиках матеріалу, як міцність, ударна в'язкість та знижує якість обробки при шліфуванні та токарній обробці.

Значення кобальту в хімічному складі швидкорізальних сталей важко переоцінити. Він є єдиним легувальним елементом, який відчутно підсилює теплостійкість матеріалу до 645-650 °C та вторинну твердість, досягаючи показників 67-70 HRC. Стали, збагачені кобальтом, характеризуються підвищеною теплопровідністю, що дозволяє знизити температуру різальної кромки інструменту на 30-70 °C під час обробки в порівнянні з аналогами без кобальту [12].

Кобальт відіграє важливу роль у:

- підсиленні стабільності твердого розчину при періодах нагрівання, що підвищує температуру початку перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$;
- затримці коагуляції карбідних часток, що вилучаються з мартенситу, що підвищує теплостійкість за рахунок зниження міцності та в'язкості;
- впливі на технологічні властивості, зокрема, зниженні гарячої пластичності та ковкості з підвищенням вмісту кобальту;
- збільшенні кількості залишкового аустеніту у загартованій сталі, що знижує твердість на 1-2 HRC;
- підсиленні процесів знеуглецювання при нагріванні як в печі, так і в розплавлених солях, і цей ефект стає виразнішим зі зростанням вмісту кобальту у сталі.

На відміну від таких елементів, як вольфрам (чи молібден), ванадій та хром, кобальт не формує карбіди. Цей елемент розподіляється у α - та γ -фазах, а також заміщає деякі атоми заліза в карбіді M_6C , відповідно до своєї концентрації у сталі. Це надає йому особливого впливу на характеристики швидкорізальних сталей, який суттєво відрізняється від впливу інших легувальних елементів і є досить складним.

Введення кобальту зміцнює твердий розчин, підвищує опір знеміцненню під час нагрівання і підвищує температурний поріг $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення. Це особливо помітно при збільшенні його вмісту до 5,0...6,0 % Co. Кобальт також сприяє більш ефективному вилученню вольфраму та молібдену з мартенситу під час відпуску, зменшуючи їх розчинність у α -фазі. Це, в свою чергу, посилює дисперсійне гартування, підвищує вторинну твердість та теплопровідність матеріалу, однак, може знижувати його міцність та в'язкість.

В технологічному аспекті, кобальт також відіграє роль, впливаючи на гарячу пластичність швидкорізальних сталей. Зі зростанням його кількості спостерігається зниження пластичності, а також збільшення ризику

зневуглецювання при термічній обробці в печах або соляних ваннах, особливо при високих концентраціях кобальту.

Кобальт підвищує теплостійкість сталей до температур у районі 645...650 °С, що зумовлено збільшенням температури $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення та уповільненням процесів коагуляції карбідів, що було зафіксовано в наукових дослідженнях [10].

1.3 Вплив азоту на структуру та властивості швидкорізальної сталі

Дослідження в області матеріалознавства виявили значний інтерес до модифікації швидкорізальних сталей з використанням елементів, що сприяють утворенню карбідів та карбонітридів, таких як титан (Ti), ніобій (Nb), ванадій (V) та цирконій (Zr), а також внесення рідкоземельних металів, зокрема церію (Ce), лантану (La) та ітрію (Y). Ці елементи позитивно впливають на видалення грубих евтектичних карбідів та оптимізують їх розподіл у швидкорізальних сталях. Проте, слід зазначити, що такі добавки можуть бути рідкісними чи дороговартісними.

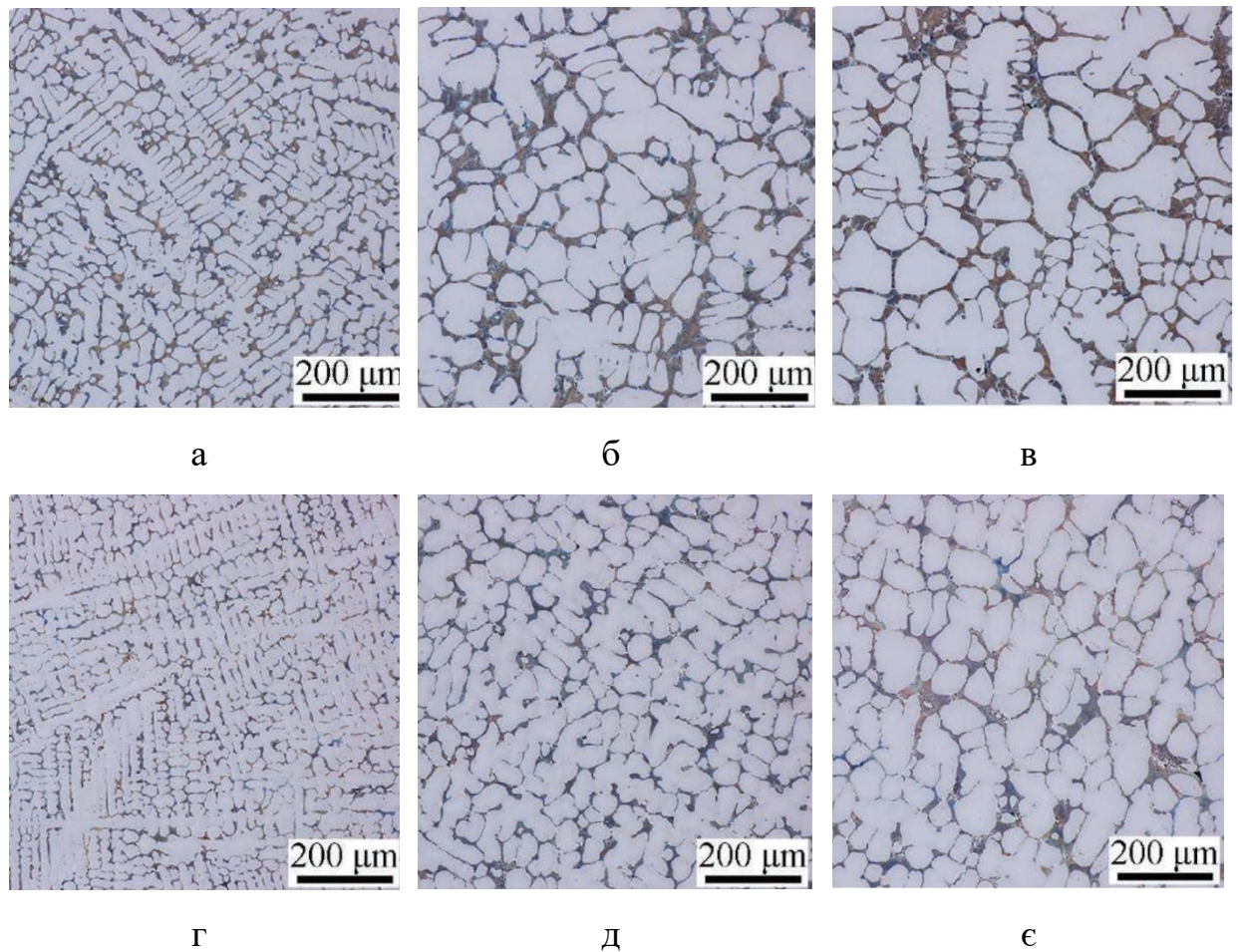
Азот (N), який є ключовим легуючим елементом, отримав широке поширення у виробництві нержавіючих сталей, де він істотно покращує механічні характеристики та стійкість до корозії. Хоча досліджень, присвячених впливу азоту на властивості HSS, не так багато, існують свідчення про те, що його внесення сприяє вдосконаленню мікроструктури та покращенню загальних характеристик цих сталей. Дослідження [15] підтвердили, що інтеграція азоту (0,115–0,145 мас. %) до сталі M41 сприяє удосконаленню литої мікроструктури, руйнуванню евтектичної мережі, скороченню об'єму та розміру евтектичних карбідів, а також підвищенню показників зносостійкості та вторинного зміцнення. Автори роботи [16] продемонстрували, що впровадження азоту (0,019–0,057 мас. %) у HS-6-5-2

веде до подрібнення мікроструктури, підвищення ступеня дисперсії карбідів та значного збільшення опору до крихкого розтріскування. Автори [15] виявили, що азотація M42 HSS (0,011–0,095 мас. %) зменшує розміри зерен у виливках та сприяє формуванню волокнистих евтектичних карбідів M_2C . Кутуєв встановив, що додавання азоту (0,07 мас.%) до сталі P6M5 поліпшує її оброблюваність при високих температурах, а також збільшує пік вторинне твердіння та червоностійкість. Додатково, науковці наголошують на можливості азоту стимулювати утворення карбідів M_2C замість M_6C , внаслідок підвищення ступеня переохолодження, необхідного для евтектичної реакції. Таким чином, застосування азоту визначається як економічно вигідний та обнадійливий підхід до вдосконалення мікроструктури та характеристик швидкорізальних сталей [16].

Проте, з огляду на обмежену розчинність азоту в швидкорізальних сталях під нормальним атмосферним тиском, зафіксовано, що концентрація азоту зазвичай не перевищує 0,1 мас. %. Крім того, існує недостатня кількість досліджень, присвячених впливу азоту на виливки з швидкорізальної сталі та вони не володіють достатньою деталізацією.

Мікроструктура виливків швидкорізальних сталей M42 та M42N (легована азотом) у різних місцях, від краю до центру, зображена на рис. 1.3 [16]. Дослідження показало, що обидва сплави мають дендритну мікроструктуру з мережею евтектичних карбідів, розподілених у міждендритних областях. Зразки, взяті з краю виливків, мають найдрібнішу структуру твердіння, що можна пояснити більш високою швидкістю охолодження під час процесу кристалізації. Як відомо, більша швидкість охолодження зменшує час місцевого твердіння, що сприяє уточненню структури кристалізації.

Порівняння мікроструктур виливків M42 і M42N у однакових позиціях виявило очевидні переваги додавання азоту (N). Це сприяє удосконаленню мікроструктури виливка та помітно поліпшує однорідність розподілу евтектичних карбідів.



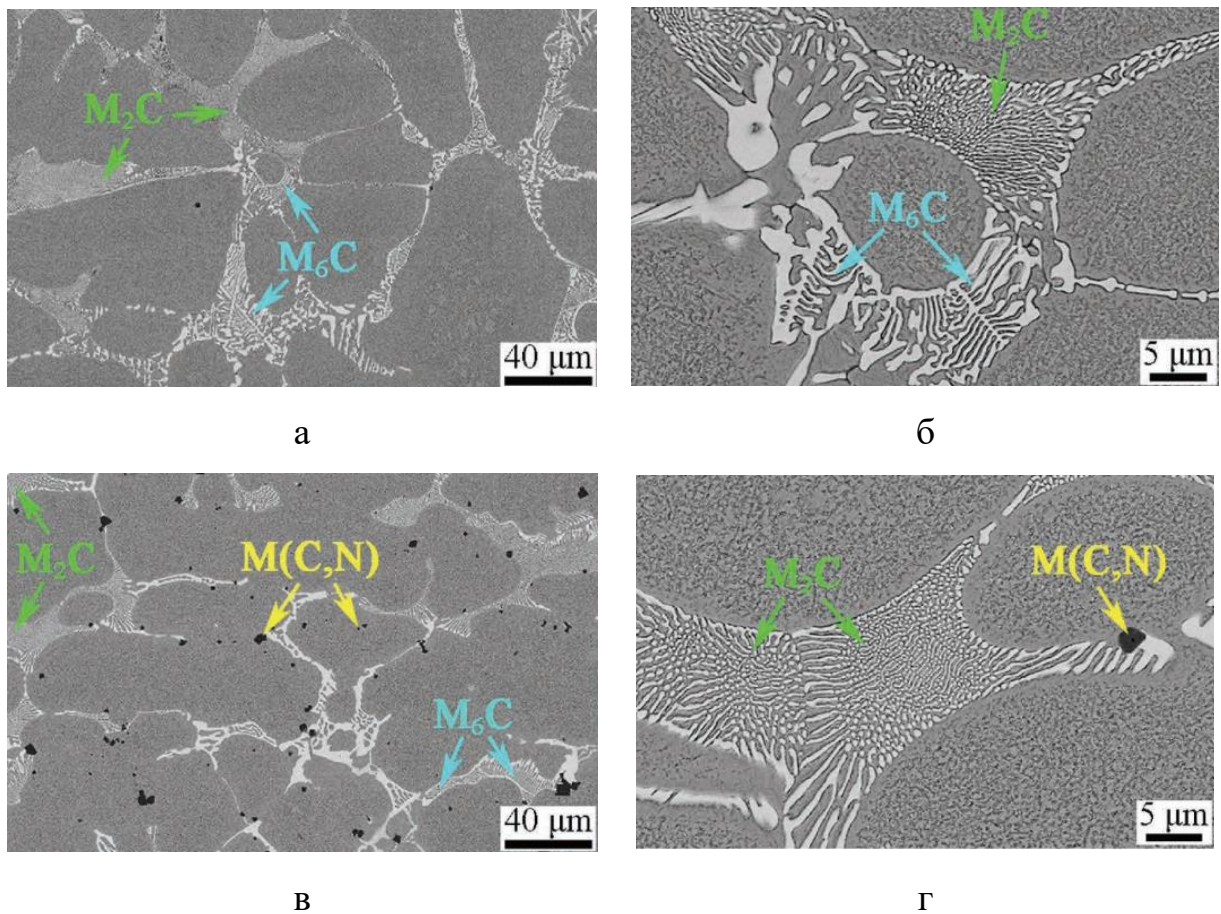
а – структура сталі М42 на краю виливка; б – структура сталі М42 на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса виливка; в – структура сталі М42 в центрі виливка; г – структура сталі М42N на краю виливка; д – структура сталі М42N на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса виливка; є – структура сталі М42N в центрі виливка

Рисунок 1.3 – Лита мікроструктура швидкорізальних сталей в різних місцях виливка [16]

На рис. 1.4 представлені зображення виливків М42 та М42N, зроблені за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Структура евтектичних карбідів обох виливків переважно складається з стрижневидних карбідів та карбідів у формі риб'ячого скелету. За допомогою дифракції рентгенівських променів (XRD) та енергодисперсійного спектрального аналізу (ЕДС),

стрижневидні карбіди та карбіди у вигляді риб'ячого скелету ідентифікуються як M_2C і M_6C відповідно [13].

Крім того, у [14] зазначено, що після додавання азоту до базового сплаву M42 у матриці чи на межі між евтектичними карбідами та матрицею з'являється більша кількість багатограних частинок. Результати XRD та ЕДС показують, що ці багатогранні частки є багатими на V частинками $M(C, N)$, причому вміст атомів N у $M(C, N)$ відчутно вищий, ніж вміст атомів C.



а – структура сталі M42, менше зменшення; б – структура сталі M42, більше зменшення; в – структура сталі M42N, менше зменшення; г – структура сталі M42N, більше зменшення

Рисунок 1.3 – Лита мікроструктура швидкорізальних сталей в різних місцях виливка, зроблена за допомогою скануючого електронного мікроскопа [14]

Згідно [15] додавання азоту до швидкорізальної сталі може підвищити вміст залишкового аустеніту, спричинити перетворення MC на $M(C, N)$, сприяти утворенню карбідів M_2C за рахунок карбідів M_6C шляхом збільшення переохолодження для евтектичної реакції та покращити рівномірність розподілу карбідів M_6C у макроскопічному масштабі. Частки $M(C, N)$ зазвичай складаються з VN та утворюються безпосередньо з рідкої фази до початку кристалізації первинного аустеніту.

Додавання високого вмісту азоту може призвести до зменшення відстані між осями дендритів 2-го порядку, а також товщини та площі фракції евтектичних карбідів, одночасно покращуючи рівномірність розподілу евтектичних карбідів у мікроскопічному масштабі. Дрібніша первинна мікроструктура може бути пов'язана з тим, що частки $M(C, N)$ збільшують кількість зародків первинного аустеніту.

Введення вмісту азоту може знизити макротвердість та границю міцності на стиснення виливку, проте збільшити його пластичність, що можна пояснити збільшенням кількості залишкового аустеніту (м'яка фаза) та зниженням кількості евтектичних карбідів (тверді фази). Додавання високого вмісту азоту до швидкорізальної сталі може значно покращити відлиту мікроструктуру, що є перспективним для подальшого підвищення механічних характеристик та терміну служби кінцевого виробу.

1.4 Постановка задач та мети дослідження

Актуальною проблемою є розробка нових типів економічно ефективних швидкорізальних сталей з пониженим вмістом дорогоцінних легувальних елементів. Ідея дослідження полягає у створенні малолегованої швидкорізальної сталі, легованої азотом, яка б забезпечила необхідний рівень

міцності, зносостійкості та термостійкості при зниженні витрат на легувальні елементи.

Метою роботи є розробка складу та технології виробництва економічно ефективної швидкорізальної сталі, легованої азотом, з поліпшеними механічними властивостями.

Основні задачі дослідження:

1. Проаналізувати літературні джерела щодо застосування азоту для легування швидкорізальних сталей.
2. Дослідити вплив азоту на структуру та фазовий склад швидкорізальної сталі P2AM3Ф3БТ.
3. Визначити механічні властивості (твердість, міцність тощо) сталі P2AM3Ф3БТ після легування азотом.
4. Порівняти отримані характеристики з властивостями традиційної швидкорізальної сталі P6M5.
5. Встановити оптимальний вміст азоту для підвищення властивостей сталі P2AM3Ф3БТ.
6. Оцінити економічну ефективність застосування азотовмісної сталі P2AM3Ф3БТ.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Проведення дослідних плавів та термічної обробки

На підприємстві АТ «Мотор Сич» виплавляли дослідні зразки сталі марок Р2АМЗФЗБТ з додаванням азоту та Р6М5. Процес відбувався у відкритих індукційних печах з фасонною вагою 50 та 100 кг, використовуючи основну футеровку. В якості сировини використовували відходи сталі ШХ15, феросплави та електродний бор. Феровольфрам додавали безпосередньо до шихти, а фероніобій та феромолібден – безпосередньо в розплавлений метал. Феротитан вводили перед виливом розплаву з печі.

Температура металу в печі підтримувалась у межах 1560-1600 °С. Розливали метал зверху напругу з печі у форми круглого перерізу для отримання злитків вагою 20 кг з печі 50 кг та 100 кг з печі 100 кг. Хімічний склад злитків наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад плавів

Марка сталі	Маса зливка, кг	Масова доля, %								
		С	W	N	Mo	V	Cr	Nb	Ti	інші
Р2АМЗФЗБТ	270	1,36	2,15	0,01	3,94	3,06	4,27	1,24	0,85	1,149
Р6М5	270	0,84	6,09	-	5,21	1,97	3,79	-	-	0,846
Р2АМЗФЗБТ	600	1,15	2,79	0,02	3,2	3,55	4,21	0,6	0,32	1,505
Р6М5	600	0,81	6,14	-	5,52	1,92	3,89	-	-	0,619

У зв'язку з високим вмістом титану та вуглецю в дослідних сталях, існували побоювання щодо формування титанової корки під час їх розливу. Тому для визначення оптимальних умов отримання високоякісного металу без пористості та з відмінною поверхнею, виконували розлив сталі у два типи форм: для отримання злитків масою 270 кг та 600 кг. Формування титанової

корки під час лиття сталі даної марки спостерігалось, зокрема на зливках масою 270 кг було виявлено корки зі скручуванням.

Поглинання ніобію при оптимальних умовах плавки досягло показника в 100 %, титану – коливалось в межах 42-44 %.

Після шестигодинної витримки у випалювальних ящиках для злитків масою 270 кг, та десятигодинної для злитків масою 600 кг, зразки були підготовлені до процесу відпалу. Режим відпалу включав наступні етапи: нагрівання з подальшою витримкою при температурі 800 °C протягом 6 годин, витримка при 850 °C протягом 8 годин; повільне охолодження зі швидкістю 20 °C/год до температури 750 °C, 30 °C/год до 600 °C, а потім природне охолодження на повітрі.

2.2 Переробка виливків

Для видалення поверхневих дефектів виливків вагою 270 кг застосовували абразивне очищення на підвісних верстатах, а виливки масою 600 кг піддавали обточуванню на токарних верстатах до глибини 12-15 мм.

Підігрів виливків перед деформацією виконували у двозонній металевій печі, відповідно до чинної технології обробки швидкорізальних сталей. Для визначення ідеальної температури нагрівання, виливки розігрівали до 1160, 1140 та 1120 °C. Виливки з кожного плаву демонстрували задовільну деформівність. Кінцеві заготовки всіх профілів і сортаменту металу після повільного охолодження в неопалюваних ямах піддавали відпалу відповідно до режиму: початковий підігрів до 800 °C із витримкою на цій температурі протягом 6-10 годин; нагрівання до 850 °C з витримкою 8 годин. Охолодження здійснювалось зі швидкістю 20 °C/год до температури 750 °C, далі зі швидкістю 30 °C/год до 600 °C, а потім – на повітрі.

2.3 Процедура виготовлення зразків для мікроструктурного аналізу

Для точної характеристики мікроструктурних властивостей необхідно мати високоякісні шліфи, якість яких безпосередньо впливає на результати мікроскопічного дослідження. Найбільш придатні для аналітичних цілей є зразки, виконані у формі простих геометричних об'єктів, зокрема кубів чи циліндрів. Аби оберегти полірувальні матеріали від ушкоджень під час процесу обробки, гострі ребра зразків заокруглюють. Розміри зразків для стандартного аналізу коливаються в межах 10-20 мм у діаметрі для круглих або в довжину для квадратних зразків та 10-15 мм у висоту. Висічення зразків здійснюється на різноманітному обладнанні, включаючи токарні, фрезерні та рубальні верстати. Для обробки металів та сплавів, які характеризуються підвищеною твердістю чи складністю обробки, вдаються до використання стандартних інструментів із твердого сплаву, а також до застосування тонкого абразивного диска чи електроерозійного вирізання. Для відбору зразків із крихких матеріалів використовують алмазні різальні інструменти. Під час механічної обробки критично важливим є запобігання перегріву зразків, що може призвести до небажаних змін у їхній структурі.

Початковий етап підготовки поверхні металу включає грубий вирівнювання зон розлому або зрізу. Подальше вдосконалення вимагає тонкого шліфування. Завершальний крок – це полірування, покликане надати поверхні дзеркальної гладкості. В процесі шліфування, яке виконується на дисках з абразивним покриттям, ключовим є регулярне охолодження деталі. Якість шліфування оцінюється за критерієм отримання абсолютно рівного шліфованого шару, для чого застосовують абразивні матеріали різної зернистості в залежності від особливостей оброблюваного матеріалу.

У процедурі полірування головною метою є усунення мікроскопічних нерівностей та поверхневих недоліків, що залишилися після шліфування. Для досягнення цієї мети застосовують спеціальні полірувальні машини, оснащені

дисками, покритими м'якими матеріалами як фетр чи оксамит. Полірувальний диск змочують рідиною, що містить абразиви - наприклад, оксид алюмінію або оксид хрому – для забезпечення ефективного видалення дрібних дефектів і досягнення високого ступеня поліровки поверхні.

У процесі дослідження мікроструктури матеріалів вдаються до методів, які дозволяють підкреслити особливості структури, зокрема шляхом створення контрасту між різними її елементами. Це досягається за допомогою створення рельєфності або нанесення барвистих відтінків на відмінні компоненти структури. Такі техніки часто базуються на принципах хімічного травлення, де кислоти в першу чергу взаємодіють з границями зерен/фаз, які є регіонами з високою концентрацією дефектів. Після процедури травлення, ці області утворюють западини, що при розсіюванні світла з'являються на мікроскопічних зображеннях як темніші ділянки, в той час як непошкоджені ділянки зерен мають яскравіший вигляд.

Для проведення мікроскопічного аналізу зразки були підготовлені шляхом хімічної обробки у спеціалізованому розчині, що складається з 92 мілілітрів хлоридної кислоти (HCl), 5 мілілітрів сульфатної кислоти (H_2SO_4), 3 мілілітри азотної кислоти (HNO_3), 5 грам сульфату міді (CuSO_4) та 50 мілілітрів етанолу ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Альтернативно, здійснено електролітичне травлення використовуючи розчин з 9,8 грама сульфатної кислоти (H_2SO_4), 16 грамів хлориду натрію (NaCl), 5,4 грама сульфату заліза (FeSO_4), та 100 мілілітрів води (H_2O), при цьому застосовуючи густину струму $0,1 \text{ A/cm}^2$ для процедури.

Щоб деталізувати розгляд мікроструктур швидкорізальної сталі, зразки були взяті на аналіз в їх первісному литому вигляді, а також після проведення повного спектру термічних процедур. Процес травлення був застосований до цих зразків, причому тривалість контакту з травильним агентом варіювалась: для литих зразків цей період становив від 8 до 10 секунд, в той час як для загартованих об'єктів час було збільшено до 150-170 секунд. По завершенні травлення, зразки були ретельно очищені водою та висушені за допомогою

фільтраційного паперу. Для металографічного дослідження були використані оптичний мікроскоп «NEOPHOT 21» та скануючий електронний мікроскоп, налаштовані на збільшення у 400, 1250 та 1600 разів відповідно.

2.4 Оцінка механічних характеристик матеріалів

В процесі визначення твердості легованих металів використовували апарат Роквелла моделі ТК-2. Якщо отримані результати твердості не перевищували показника в 100 HRB, застосовувалася методика з використанням сталеві кулі в якості індентора, з результатами, що реєструвалися на шкалі В (HRB). У випадках, коли твердість матеріалу перевищувала зазначений ліміт, переходили до шкали С (HRC), застосовуючи алмазний конус як індентор. Для стандартизації результатів твердості до єдиної шкали, користувалися таблицею конверсії, в якій значення HRB 100 відповідає HRC 20.

Визначення ударної в'язкості матеріалів здійснювалося на основі випробувань стандартних зразків Менаже з перерізом 10x10 мм і довжиною 55 мм, не створюючи додаткових надрізів на поверхні. Експерименти проводили з використанням ударного механізму типу Шарпі.

За допомогою універсального випробувального пристрою МК-30А вимірювали міцність матеріалів при згині. Випробувальні зразки з габаритами 10x10x55 мм, які не містили надрізів, піддавали навантаженню до 1200 кПа, щоб оцінити їхню стійкість до деформації при згині.

Визначення границі текучості проводилося за допомогою пристрою ПД-40. Вміст залишкового аустеніту оцінювали в пробах розмірами 6x6x50 мм за допомогою магнітометричного комплексу БУ-2, з порівнянням з аналогічним зразком сталі, який пройшов процедуру відпалу.

Термічна обробка включала процес гартування з використанням різноманітних температурних умов, а також триразовий відпуск при температурі 560 °С, кожен етап тривав одну годину.

Для термічної обробки металевих виробів використовували стандартне пічне обладнання та прилади для контролю та вимірювань. Операції відпалу проводили в камерних печах, в той час як процеси гартування та відпуску відбувались у ваннах – електролітних для гартування та тигельних для відпуску. Гартування здійснювалося у ванні, наповненій хлоридом барію, в той час як для відпуску використовували ванну з розчином селітри.

2.5 Механізм функціонування растрового електронного мікроскопа

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) становить важливий аналітичний апарат у дослідженні мікроструктур різноманітних металевих сплавів. Його застосування дозволяє досягти високої роздільної здатності та глибини фокусу при візуалізації поверхонь, а також здійснювати точний хімічний розбір ділянок зразка, користуючись сучасним рентгенівським спектрометром, інтегрованим у систему.

В основі функціонування РЕМ лежить випромінювання електронів, які генеруються вольфрамовим катодом, нагрітим до температури 2430°С. Ці електрони прискорюються у електричному полі, створеному різницею потенціалів до 50 кіловольт між катодом і анодом. Далі електронний пучок прямує крізь набір конденсорних лінз, які зосереджують його у дуже вузький зонд, діаметром від 0,1 до 3 мікрометрів. Коригування інтенсивності пучка та точність його фокусування на зразку досягаються шляхом модуляції струму в лінзах, які взаємодіють з магнітними полями.

Статичний або растрово-сканований електронний промінь, що керується за допомогою генератора сканування та системи відхилення, спрямовується на

зразок. Синхронізований з цим процесом візуальний сигнал проектується на екран електроннопроміневого пристрою. Взаємодія зразка з первинними електронами ініціює ряд феноменів: еластичне розсіяння електронів із мінімальними змінами енергії; поглинання електронів; емісія вторинних електронів із зовнішніх електронних шарів атомів внаслідок нееластичних зіткнень з первинними електронами; випромінювання характеристичного рентгенівського випромінювання внаслідок збудження внутрішніх електронних оболонок атомів. Це характеристичне рентгенівське випромінювання містить важливу інформацію про елементний склад матеріалу, адже енергетичний спектр та хвильові довжини квантів є специфічними для кожного елемента. Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) незамінний для вивчення мікроструктур металевих сплавів, зокрема завдяки його здатності до високого розділення елементів зображення та точного визначення глибини різкості. Вбудований рентгенівський мікроаналізатор розширює можливості РЕМ, дозволяючи виконувати детальний хімічний аналіз специфічних ділянок зразків.

Під час аналізу поверхонь матеріалів за допомогою растрового електронного мікроскопу (РЕМ), вивчення локальних характеристик, таких як фазові включення та варіації поверхні, відбувається через реєстрацію змін у інтенсивності відбитих електронів. Ці коливання інтенсивності модулюють яскравість на моніторі мікроскопа, створюючи контрастне зображення аналізованої поверхні.

У використанні РЕМ виділяють дві ключові категорії контрасту: хімічний контраст, який відображає різницю у хімічному складі зразка, і топографічний контраст, який відповідає за візуалізацію рельєфних особливостей. Зони, що мають елементи з вищим атомним номером, демонструють підвищену яскравість, оскільки кількість відбитих електронів і атомний номер знаходяться у прямій взаємозалежності. Кутовий нахил поверхні зразка сприяє формуванню топографічного контрасту залежно від

інтенсивності електронного променя, що впливає на об'єм реєстрованих електронів.

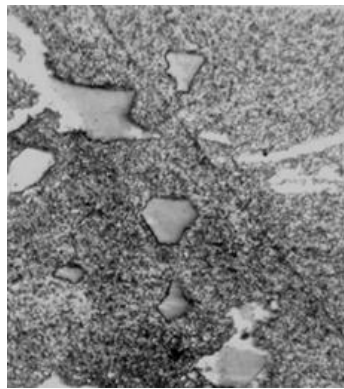
Тривимірний ефект структури, який спостерігається в РЕМ, є наслідком високої глибини різкості зображення, що є важливим для розробки стратегій аналізу поведінки матеріалів під час їх деформацій та руйнувань. Зокрема, відображення контрасту, отриманий за допомогою струму поглинання, конструюється протилежно до того, який спостерігається через відбиті або вторинні електрони.

Масштабування зображень у РЕМ досягається порівнянням величин скануючого растра на дисплеї із фізичними розмірами растра на зразку, які можна модифікувати, змінюючи потужність струму в котушках сканування. Діапазон масштабування в РЕМ може досягати від 50 до 200 тисяч разів, що відкриває значно ширші перспективи у порівнянні з традиційними оптичними мікроскопами.

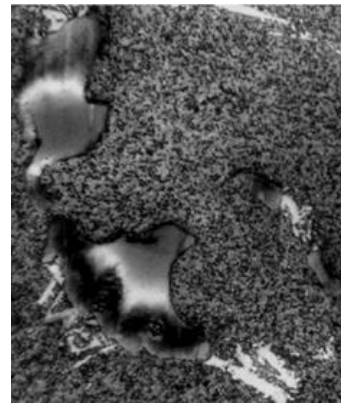
3 ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛІ ПІСЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

3.1 Морфологія литих сталей

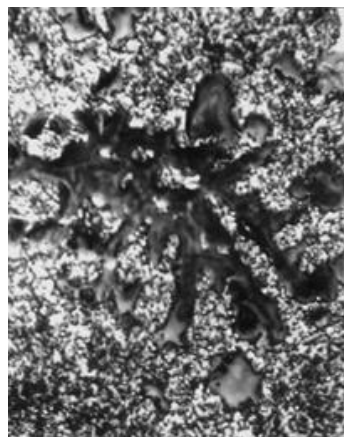
Для аналізу морфології литих сталевих сплавів були використані зразки, отримані із центру перерізу шаблонів, вирізаних з центральної частини виливків. Мікроструктура цих литих сталей з експериментальних плавок виявилась гетерогенною, включаючи мартенсит, аустеніт та різноманітні карбіди та карбонітриди, що демонструється на рис. 3.1.



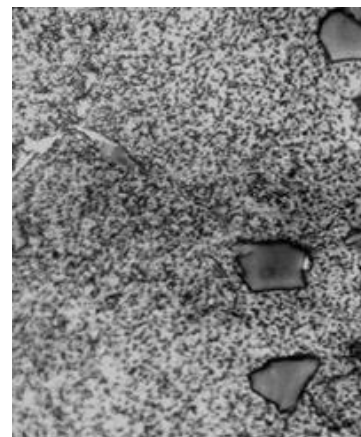
а



б



в



г

а – карбонітрид (TiNb)C; б – карбід (VNb)C; в – карбід TiC;

г – карбонітриди Ti, Nb, V

Рисунок 3.1 – мікроструктура сталі P2AM3Φ3BT, x1250 (а, б, в), x1600 (г)

Сталеві дендритні області типу P2AM3Ф3БТ відзначалися присутністю карбідів та карбонітрідів, стійких до високих температур, які мали такі особливості:

- карбонітриди ніобію мали чіткі геометричні форми, збагачені ванадієм і вміщували сліди титану, набували коричневого кольору після процедури термічного травлення (рис. 3.1, а);

- карбіди ванадію, змішані з іншими легувальними елементами, крім титану, які після травлення теплової обробки переходили у синій колір (рис. 3.1, б);

- титанові карбіди, котрі виявлялися в різних розмірах, включаючи окремі крупні утворення, що з'єднувалися в кластери, перетворювалися на коричневий відтінок після застосування теплового травлення (рис. 3.1, в);

- складні карбонітриди, що включали титан, ніобій та ванадій, з правильною формою, які також набували коричневого кольору після термічного травлення (рис. 3.1, г).

У просторах між дендритами обох типів сталів було виявлено пластинчасту евтектику, складену з карбідів M_2C , меншої кількості карбідів ванадію, що після травлення набували жовтого кольору, та γ -фаз.

Після процедури відпалу, мікроструктура литої сталі демонструвала наявність сорбітоподібного перліту, а також первинних та вторинних карбідів.

3.2 Аналіз характеру карбідних фаз

У рамках дослідження було створено проби, як це було описано у розділі 2.1. Три проби кожного виду швидкорізальної сталі були сформовані для представлення трьох станів: після відпалу, після гартування, а також після гартування з подальшим відпуском. Вони були розміщені в дві спеціальні контейнери (по три проби в кожному), одночасно піддані шліфуванню та

поліруванню, а потім зазнали процедури термічного травлення для визначення карбідів за допомогою кольорової диференціації.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводився на пристрої "М-46", дозволяючи визначати інтенсивність K_{α} -випромінювання для таких елементів, як титан, ванадій, хром, залізо та L_{α} -лінії для ніобію, молібдену, вольфраму. Цей аналіз передбачав попередній вибір карбідів за зображенням у потоці поглинених електронів. В якості стандартів використовувалися чисті метали.

Виявлено, що основними типами карбідів у відпаленому стані є M_2C та MC . Процеси гартування та відпуску не впливають на їхній хімічний склад, однак викликають розпад карбіду M_2C на M_6C та MC . Спроби визначення змін у легуванні твердого розчину після кожного етапу термічної обробки не увінчалися успіхом через присутність мікроскопічних вторинних карбідних виділень, які утворювались під час відпалу та відпуску.

Коричневі відтінки, що проявилися на фазах під час процедури термічного травлення, індикують присутність карбідів MC з основою із титану та ніобію. Ці фази демонструють змінність у хімічному складі, варіюючись від TiC до $(Ti, Nb)C$ і навіть до NbC , причому вони можуть містити ванадій. Сині та жовті відтінки на фазах свідчать про наявність ванадієвих карбідів MC , у склад яких також входить ніобій. Фази, які виявляються білими під час травлення, представляють собою карбіди M_2C . Цікаво, що титан і ніобій не є значущими компонентами у складі матриці.

3.3 Властивості сталі у відпаленому стані

Після проведення процедури відпалу мікроструктурний склад досліджуваних швидкорізальних сталей характеризується наявністю сорбітоподібного перліту та ізольованих карбідів/карбонітрідів. Для визначення розміру останніх використовувався автоматизований

макроаналізатор. Згідно з аналітичними даними, виявлено, що середній розмір карбідів у вивчених сталях виявився меншим порівняно з тим, що спостерігається у сталі марки Р6М5, що підтверджується даними, представленими в табл. 3.1. В аналізованих зразках сталі спостерігалася знижена присутність карбідів у порівнянні зі сталлю марки Р6М5, що можна пов'язати з їх меншою кількістю легувальних елементів. Досліджувані сталі демонструють відповідний рівень твердості та однорідність розподілу карбідних фаз по всій структурі. рис. 3.2, рис. 3.3.

Таблиця 3.1 – Властивості металу, що досліджувався в стані поставки

Марка сталі	Твердість		Бал карбідної неоднорідності	Глибина зневуглецьова ного шару, мм	Центральна пористість, бал
	Діаметр відбитка	НВ			
Р2АМ3Ф3БТ	3,9	238	3	0,64-0,65	< 1
Р6М5	-	-	4	0,66-0,88	< 1

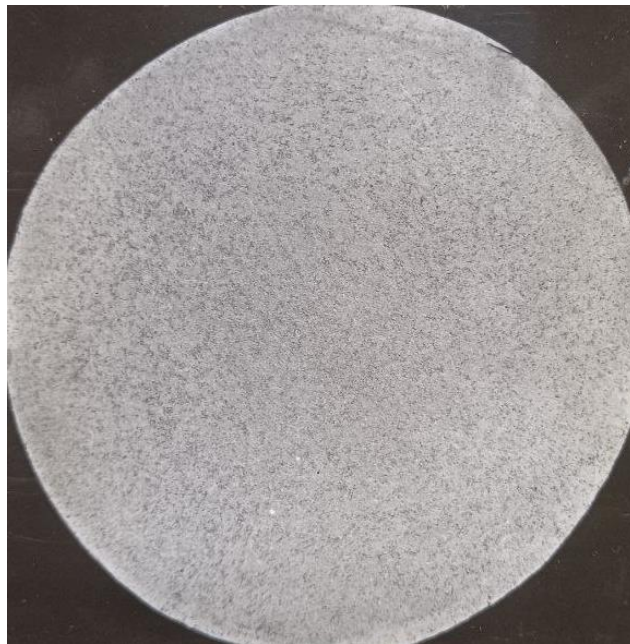


Рисунок 3.2 – Мікроструктура сталі Р2АМ3Ф3БТ, х400



а



б

а – сталь Р2АМ3Ф3БТ (бал 3); б – сталь Р6М5 (бал 4)

Рисунок 3.3 – Карбідна неоднорідність дослідного металу

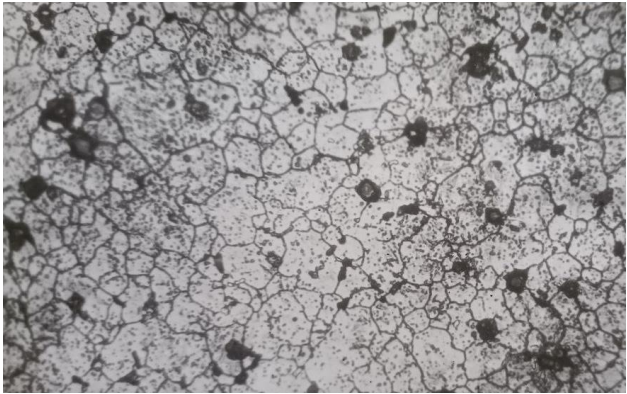
3.4 Характеристики сталі після гартування

В ході аналізу характеристик металу, одержаного з великомасштабних виплавів, було виявлено, що збільшення температури гартування до 1230 °С призводить до інтенсивного збільшення розміру зерен аустеніту, що в свою чергу знижує механічні характеристики. Таким чином, властивості металу з дослідно-промислового виплаву були проаналізовані при температурах гартування в межах 1180 °С, 1200 °С та 1220 °С.

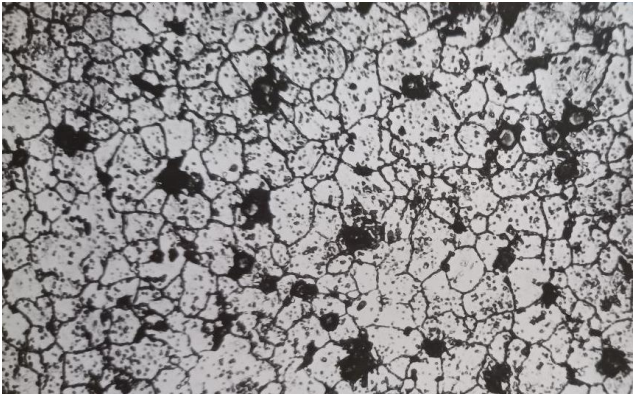
Дані щодо розмірів зерен аустеніту представлені у табл. 3.2, рис. 3.4. Було встановлено, що при температурах 1200 °С та 1220 °С розмір зерен аустеніту в досліджуваній сталі був меншим порівняно із сталлю Р6М5.

Таблиця 3.2 – Вплив температури гартування на розмір аустенітного зерна

Марка сталі	Розмір зерна після гартування від різних температур, номер		
	1180 °С	1200 °С	1220 °С
Р2АМЗФЗБТ	10	9	9
Р6М5	10	10	10



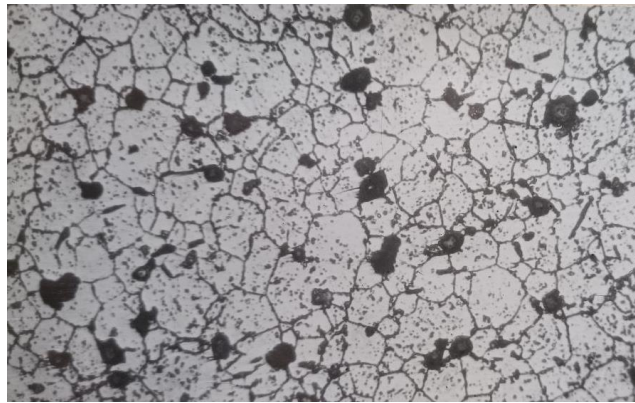
а



б

а – 1180 °С; б – 1200 °С

Рисунок 3.4 – Мікроструктура сталі Р2АМЗФЗБТ після гартування з різних температур, х400



В

В – 1220 °С

Рисунок 3.4 – Аркуш 2

Варто підкреслити, що експериментальна сталь характеризується більш дрібнозернистою структурою, однак вона також має неоднорідність зерен, що є типовим для швидкорізальних сталей з низьким вмістом вольфраму.

Збільшений вміст вуглецю та азоту в експериментальній сталі у порівнянні зі сталлю Р6М5 зумовив підвищення твердості після гартування, що підтверджується даними, представленими в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив температури гартування на твердість дослідних сталей

Марка сталі	Твердість після гартування від різних температур, HRC		
	1180 °С	1200 °С	1220 °С
Р2АМЗФЗБТ	65	64	63
Р6М5	63,5	63,0	62,5

Також цей висновок корелює з результатами визначення кількості залишкового аустеніту після гартування від 1220 °С, що відображено в табл. 3.4. Внаслідок збільшення масової частки вуглецю та азоту в аустенітній

матриці спостерігалось підвищення температури початку мартенситного перетворення, що призвело до зменшення кількості аустеніту після гартування.

Таблиця 3.4 – Вплив температури гартування на кількість залишкового аустеніту

Марка сталі	Об'ємна доля залишкового аустеніту після гартування від різних температур, %		
	1180 °C	1200 °C	1220 °C
P2AM3ФЗБТ	15	16	23
P6M5	20	22,3	23,3

3.5 Властивості сталі після відпуску

Збільшений вміст вуглецю та азоту в експериментальній марці сталі впливає на її властивості після відпуску. Так, у металі промислового виплавлення після триразового відпуску (на 1 годину) при 560 °C аустеніт майже повністю перетворювався, що не залежало від температури гартування, як це підтверджено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Перетворення аустеніту в результаті відпуску (560 °C, 3 рази по 1-й годині)

Марка сталі	Об'ємна доля залишкового аустеніту після гартування від різних температур, %		
	1180 °C	1200 °C	1220 °C
P2AM3ФЗБТ	0,9	0,7	0,3
P6M5	0	0	0

Вуглець та азот також сприяють збільшенню вторинної твердості та червоностійкості (табл. 3.5 та табл. 3.6). Привертає увагу відсутність зростання вторинної твердості з наростанням кількості відпусків у експериментальній сталі, особливо після третього відпуску.

Таблиця 3.5 – Залежність вторинної твердості від температури гартування та кількості відпусків

Марка сталі	Твердість після гартування та відпуску, HRC								
	1180 °C			1200 °C			1220 °C		
	Кількість відпусків								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
P2AM3ФЗБТ	66	65,5	65,0	66,0	66,0	65,0	66,5	66,5	65,5
P6M5	65,5	65,5	65,0	66,5	66,0	66,0	66,0	66,0	65,5

Червоностійкість визначали після додаткового 4-годинного відпалу при 620 та 630 °C зразків, які пройшли термічну обробку з метою визначення вторинної твердості.

Таблиця 3.6 – Червоностійкість сталей, що досліджувались

Марка сталі	Твердість після гартування та відпуску, HRC					
	1180 °C		1200 °C		1220 °C	
	Температура відпусків					
	620 °C	630 °C	620 °C	630 °C	620 °C	630 °C
P2AM3ФЗБТ	59,0	55,5	59,5	56,5	60,5	57,5
P6M5	59,0	56,5	59,0	57,5	58,5	57,5

Отже, навіть зі зниженим вмістом вольфраму та молібдену, експериментальна сталь виявляє запас високої твердості та червоностійкості після гартування з температури 1200 °C та вище, за умови додаткового відпуску при 620 °C. Міцнісні характеристики зазначеної сталі також

заслужують на увагу, вони не поступаються якостям швидкорізальної сталі Р6М5, що підтверджено даними, представленими у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Вплив температури гартування на міцність при згині

Марка сталі	Міцність при згині після гартування від різних температур, МПа		
	1180 °C	1200 °C	1220 °C
Р2АМЗФЗБТ	3797	3582	3337
Р6М5	3800-3900	3550-3600	3300-3400

Таким чином, аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що сталь Р2АМЗФЗБТ, яка має меншу кількість легувальних елементів, але водночас збагачена вуглецем і азотом, демонструє механічні властивості порівнянні зі сталлю Р6М5 після проходження термічної обробки. Це робить її потенційно придатною для застосування в якості аналога вищезазначеної швидкорізальної сталі.

3.6 Висновки за розділом 3

1. Аналіз морфології показав, що лита сталь Р2АМЗФЗБТ має гетерогенну структуру, яка включає мартенсит, аустеніт та різноманітні карбіди і карбонітриди на основі Ti, Nb та V.

2. Встановлено, що основними карбідними фазами є M_2C та MC на основі Ti і Nb. Процеси гартування і відпуску призводять до часткового розпаду вихідного карбіду M_2C з утворенням M_6C та MC , але не змінюють хімічний склад карбідів.

3. У відпаленому стані середній розмір карбідів в Р2АМЗФ3БТ (3,9 мкм) всього на 0,1 мкм менший, ніж в Р6М5. При цьому твердість 238 НВ є достатньо високою.

4. Після гартування спостерігається менший розмір зерен аустеніту в Р2АМЗФ3БТ порівняно з Р6М5. Підвищений вміст С і N (на 0,15 % і 0,12 % відповідно) забезпечує більш високу твердість.

5. Відпуск призводить до майже повного розпаду залишкового аустеніту в Р2АМЗФ3БТ. Вторинна твердість і червоностійкість експериментальної сталі не поступаються рівням Р6М5.

6. Характеристики міцності сталі Р2АМЗФ3БТ схожі зі Р6М5 після термообробки. Це дає підстави розглядати Р2АМЗФ3БТ як потенційну заміну Р6М5, незважаючи на менший вміст дорогих легувальних елементів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі проведено аналіз потенційних небезпек та описано основні заходи щодо забезпечення охорони праці при проведенні досліджень зразків швидкорізальних сталей, зокрема Р6М5 та Р2АМЗФЗБТ.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Потенційні ризики, які можуть виникнути під час наукових досліджень, охоплюють:

1. Нестача професійних знань у фахівців, нерозуміння технологічних процесів та незнайомство з робочою документацією можуть призвести до неочікуваних надзвичайних ситуацій у професійній діяльності.

2. Спектральний аналіз за допомогою спектрофотометрів, рентгенофлюоресцентний аналіз із застосуванням рентгенофлюоресцентних мікроаналізаторів, а також дериватографічний аналіз, який проводиться за допомогою дериватографів, несуть в собі певні ризики. Ці ризики включають вплив інтенсивного електронного та оптичного випромінювання під час спектрального аналізу, а також іонізуючого випромінювання, що є характерним для рентгенофлюоресцентного аналізу.

3. У процесі підготовки матеріалів або зразків до термообробки існують ризики, які виникають при використанні абразивних інструментів, особливо якщо порушуються встановлені норми охорони праці, зокрема НПАОП 28.0-1.30-12 [17]. Ці ризики включають можливість отримання механічних травм у випадку застосування неатестованого абразивного інструментарію та при ігноруванні правил експлуатації, що може призвести до важких наслідків.

4. Використання обладнання для оптичної металографії таїть у собі ризики, пов'язані з можливим ушкодженням зорової системи через неналежне використання світлофільтрів та оптичних елементів мікроскопії. Існує також ризик механічних ушкоджень під час підготовки зразків для визначення твердості або інших механічних властивостей, особливо при несуворому дотриманні норм охорони праці. До потенційних загроз належать використання застарілого лабораторного обладнання та порушення процедур безпеки під час проведення випробувань.

5. Ризики, що виникають через несумлінне ставлення роботодавців до виконання вимог документу НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення охорони праці працівників» [18], зокрема:

- прогалини в організації та підтриманні безпечних умов на робочих місцях, що стосуються не проведення необхідних організаційних заходів, таких як інструктажі з охорони праці, оцінювання знань працівників у цій сфері, а також відсутність інформування працівників про можливі загрози;

- використання обладнання, яке не відповідає встановленим стандартам безпеки, внаслідок його неправильної експлуатації, браку захисних пристроїв, неадекватних умов для евакуації, або перешкоджання доступу до евакуаційних шляхів;

- використання неналежних виробничих просторів, котрі можуть призвести до зниження структурної міцності будівель, перевищення допустимих норм концентрації шкідливих речовин у повітрі, а також до недостатньої освітленості робочих зон.

6. Ризики, що виникають через порушення принципів ергономіки під час створення робочих місць для дослідників у лабораторних приміщеннях, включають невідповідність габаритів робочих зон вимогам та перевантаження простору більшою кількістю осіб, ніж дозволено, згідно з нормами ДБН В.2.2-28:2010. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення [19] та СНиП 2.09.02-85 «Виробничі будівлі» [20]. Також до цих

ризиків належить нераціональне розташування дослідницького обладнання та офісної апаратури.

7. Ризики, пов'язані з тривалим використанням комп'ютерної техніки, охоплюють ушкодження опорно-рухової системи внаслідок монотонної діяльності у незмінній позі, що може призводити до зниження робочої ефективності та розвитку професійних захворювань.

8. Недотримання визначених НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [21] умов пожежної безпеки можуть спричинити загоряння. Недостатня увага до вибору відповідності типів та кількості первинних засобів пожежогасіння з урахуванням категорій приміщень становить потенційну причину пожеж.

4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці та пожежної безпеки

4.2.1 Захист працівників у робочій зоні

Згідно з керівними принципами документу 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», встановлені такі основоположні зобов'язання:

- неухильне дотримання процедури навчання та атестації з питань охорони праці для усіх працівників відповідно до критеріїв, викладених у «Типові положення про порядок організації навчання і методики перевірки знань з охорони праці», що були прийняті відповідно до наказу Державної служби з нагляду за охоронною праці від 26.01.2005 №15;

- обов'язок роботодавця забезпечити поінформованість кожного працівника щодо всіх аспектів охорони праці, які мають відношення до загальних умов на підприємстві, так і до специфічних умов, пов'язаних з виконанням їхніх професійних завдань. Це включає інформування про

можливі ризики та стратегії їх запобігання. Для реалізації цього завдання пропонується застосування різноманітних форм інструктажів: вступного, первинного при призначенні на посаду, регулярного повторення, позапланового у випадку змін у робочому процесі та цільового для специфічних видів робіт;

- встановлені критерії для організації робочих зон передбачають створення умов, при яких обладнання та системи захисту знаходяться в стані, що гарантує безвадну експлуатацію. Це включає розробку процедур для ефективного усунення будь-яких технічних збоїв, які можуть становити загрозу безпеці чи здоров'ю персоналу. Обов'язковим є також впровадження регулярного моніторингу та аудиту захисних механізмів і систем, що служать для попередження або усунення потенційних ризиків.

Оптимізація робочого простору, призначеного для проведення наукових досліджень, повинна враховувати останні досягнення в області ергономіки, забезпечуючи раціональне розміщення обладнання та документації. Це дозволяє підвищити продуктивність науковців шляхом створення умов, які сприяють легкості доступу та комфорту під час виконання дослідницьких завдань.

Поверхня робочого столу ВДТ повинна забезпечувати можливість зміни висоти в межах 680-800 мм. Розміри ширини та глибини столу необхідно підібрати так, щоб забезпечити зручність роботи в просторі, який ефективно охоплює моторна активність (оптимальні розміри становлять: ширина - від 600 до 1400 мм, глибина - від 800 до 1000 мм).

Конструкція столу мусить передбачати достатньо простору для розміщення ніг користувача. Мінімально допустимі розміри простору для ніг становлять: не менше 600 мм у висоту, не менше 500 мм у ширину та не менше 450 мм у глибину на рівні колін, збільшуючись до не менше ніж 650 мм на рівні витягнутих ніг.

Що стосується робочого крісла, то воно має бути оснащене механізмами, які дозволяють здійснювати підйом і обертання, а також регулювати висоту

сидіння, кут нахилу сидіння та спинки, і відстань між спинкою та передньою кромкою сидіння. Сидіння має бути розроблене з плоскою поверхнею та легко заокругленим переднім краєм. Кожен з параметрів регулювання крісла має бути незалежним, забезпечувати простоту і надійність у фіксації змін. Інтервал регулювання компонентів крісла має становити 15...20 мм для лінійних розмірів і 2...5 градусів для кутових, при цьому зусилля, потрібне для регулювання, не повинно перевищувати 20 Н.

Робоче крісло мусить мати можливість зміни висоти сидіння в межах від 400 до 500 мм, тоді як мінімальні параметри ширини та глибини не повинні бути менші за 400 мм. Також сидіння має забезпечувати регулювання кута нахилу до 15 градусів вперед та до 5 градусів назад.

Висота спинки крісла має становити 300 ± 20 мм та ширину не менше ніж 380 мм, забезпечуючи радіус кривизни в горизонтальній площині на рівні 400 мм. Нахил спинки потрібно регулювати в межах від 1 до 30 градусів відносно вертикального положення. Дозволена регульована відстань від спинки до передньої частини сидіння має коливатися від 260 до 400 мм.

Щоб знизити статичне навантаження на м'язову систему верхніх кінцівок, рекомендується застосування підлокітників довжиною від 250 мм і шириною між 50 і 70 мм. Висота підлокітників над сидінням має бути регульована в діапазоні від 230 до 260 мм, а відстань між ними повинна бути від 350 до 500 мм.

4.2.2 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці

Створення оптимальних умов мікроклімату в промислових приміщеннях забезпечується за допомогою інтегрованих систем центрального опалення та вентиляції, які функціонують відповідно до встановлених державних будівельних норм ДБН В.2.5-67:2013 [22], що регламентують питання

опалення, вентиляції та кондиціонування. У холодну пору року використовуються системи централізованого опалення, які забезпечують рівномірний розподіл тепла у зонах виконання робіт.

Крім того, існують заходи колективного та особистого захисту персоналу від впливу шкідливих речовин у повітрі. Для нейтралізації шкідливих газів, пилу та аерозолів у приміщеннях встановлені системи локальної витяжної вентиляції, що ефективно усувають токсичні випаровування відразу у місцях їх виникнення. Локальні відсмоктувальні пристрої є невід'ємною частиною виробничого устаткування, забезпечуючи безпеку роботи з машинами завдяки активній вентиляції.

З метою забезпечення надійного захисту персоналу під час виконання робіт, що містять ризик контакту з токсичними чи забруднюючими речовинами, запроваджено цілий ряд превентивних заходів:

- використання спеціалізованого захисного одягу, такого як костюми, мантиї та захисні фартухи, є обов'язковим при роботі з речовинами, що містять токсичні складові;

- для нейтралізації ризику впливу агресивних хімічних агентів, як-от луги та кислоти, працівникам надаються захисні гумові взуття та рукавички;

- спеціальні захисні пасти, що мають властивості протидії токсичним речовинам, стійкість до олій та здатність відштовхувати воду, застосовуються для оберігання шкірних покривів рук, обличчя та шиї;

- з метою захисту очей від можливих хімічних опіків та подразнень, введено в обіг захисні окуляри з герметичними оправами, маски та шоломи, оснащені спеціальним захисним склом;

- захист органів дихання здійснюється за допомогою фільтруючих та ізолюючих пристроїв, включно з газовими масками та респіраторами, щоб уникнути вдихання шкідливих речовин.

Ці заходи є невід'ємною частиною системи охорони праці та спрямовані на зниження ризиків для здоров'я та безпеки працівників.

4.2.3 Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження

В області металургії прогресивним підходом є ідентифікація структурних характеристик металів, дослідження їх фазових складів, точне визначення механічних атрибутів, виробничих та експлуатаційних властивостей матеріалів, а далі – аналіз і впровадження отриманих даних з метою інноваційного розвитку.

Для забезпечення належного рівня безпеки під час проведення досліджень, наступні превентивні заходи вважаються незамінними:

1. Захист від механічних пошкоджень під час обробки зразків вимагає використання обладнання, яке знаходиться у відмінному стані. Необхідно регулярно оновлювати зношене обладнання та використовувати індивідуальні засоби захисту, включаючи захисні окуляри та рукавички. Захисні окуляри із бічними щитками є обов'язковими для уникнення травм очей через летючі частки, що можуть вилітати з різних боків. Використання прозорих захисних екранів також рекомендоване для забезпечення додаткового захисту від часток, які можуть відокремлюватися під час експериментальної роботи.

2. При виконанні робіт, що пов'язані з використанням шліфувальних та заточувальних апаратів, слід суворо дотримуватися певних правил безпеки:

- тільки технічні спеціалісти, які мають відповідну кваліфікацію та пройшли спеціалізоване навчання, мають право здійснювати установку абразивних дисків на обладнання;

- суворо забороняється застосування абразивних коліс із виявленими дефектами, адже це становить загрозу безпеці та може спричинити нещасні випадки. Кожне коло повинно мати ідентифікаційну етикетку або маркування, яке містить інформацію про проведене випробування, включно з унікальним ідентифікатором та підписом відповідального фахівця;

- важливо забезпечити наявність інформаційних табличок біля кожного пристрою, на яких має бути зазначена максимально дозволена швидкість

роботи абразивного кола та швидкість обертання шпинделя, виражена в обертах за хвилину;

- для забезпечення безпеки під час виконання робіт із використанням абразивних дисків істотною є установка захисних оболонок, що прикривають виступаючі частини шпинделя та елементи кріплення. Облаштування робочої зони для підручників має бути розраховано таким чином, щоб забезпечити надійне утримання деталі, яка підлягає обробці. Проміжок між краєм підручника та активною поверхнею шліфувального диска повинен бути не більший ніж 3 мм;

- здійснення операцій без використання підручників, захисних щитів або окулярів, а також робота на обладнанні без заземлення чи системи видалення абразивного пилю є неприпустимими. Ці вимоги встановлені відповідно до державного стандарту ГОСТ 12.3.028-82, який стосується застосування абразивних та ельборових інструментів у виробничих процесах.

3. Для зниження ймовірності механічного ушкодження при формуванні експериментальних зразків необхідно дотримуватися наступних заходів безпеки:

- здійснювати роботу виключно за допомогою апаратури, що знаходиться у відповідному технічному стані, з особливою увагою до тимчасово вичерпаних компонентів, вимагаючи їх негайної заміни;

- строго дотримуватися використання індивідуальних засобів захисту, зокрема захисних окулярів та рукавичок, для надійного захисту рук та очей від можливих ушкоджень;

- для уникнення травмування зорових органів застосовувати окуляри зі спеціальними бічними захисними елементами, здатними забезпечити захист від літаючих часток не тільки спереду, але і з боків та знизу;

- рекомендується використання прозорого захисного екрану для повного огороження обличчя працівника, що ефективно запобігає потраплянню сторонніх частинок до очей під час виконання роботи.

4.2.4 Заходи з пожежної безпеки

Для забезпечення пожежної безпеки у дослідницьких приміщеннях впроваджуються системи адресно-порогового пожежного сповіщення, до складу яких входить апарат "Сигнал-10". Така система підтримує інтеграцію до десяти адресних сповіщувачів пожежі в один ланцюг. Ці сповіщувачі оснащені функцією надсилання інформації про свій поточний стан на запит керуючого пристрою. Апарат "Сигнал-10" систематично здійснює запити стану від усіх під'єднаних сповіщувачів, що дозволяє неперервно контролювати їхню працездатність та виявляти пристрої, які можуть бути несправними або мають ознаки майбутніх неполадок.

Зібрана інформація від адресних сповіщувачів, що обробляється пристроєм "Сигнал-10", включає такі становища як "Норма", "Потребує обслуговування через запиленість", "Вихід із ладу", "Пожежа", "Активація пожежного сповіщувача вручну", "Тестування системи" та "Вимкнення системи".

Кожен із адресних датчиків представляє індивідуальну адресну зону в системі. Інтегровані з мережевим контролером, ці зони можуть бути активовані чи деактивовані окремо. Коли виконуються команди на встановлення чи зняття охорони для адресно-порогових шлейфів, вони впливають на увесь набір адресних зон, пов'язаних з цим шлейфом, не змінюючи стан тих зон, які не включені до шлейфу.

Планування та розробка систем протипожежного водопостачання має відбуватися у відповідності із національними будівельними стандартами. Відповідно до ДБН В.2.5-64:2012, розроблені норми для внутрішніх систем водопроводу та каналізації, обумовлюючи деталі проектування та конструкції. Згідно з ДБН В.2.5-74:2013, встановлюються положення для зовнішнього водопостачання та пов'язаних з ним споруд. ДБН В.2.5-75:2013 встановлює критерії для зовнішніх каналізаційних мереж та відповідних конструкцій.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-56:2014, які слугують регулятивним документом для розробки систем автоматизованого пожежогасіння, розробляються проекти, що відповідають встановленим нормам у сфері протипожежного захисту.

Первинні засоби для локалізації та гасіння пожеж, зокрема вогнегасники різних типів, вводяться в експлуатацію на основі нормативних вказівок, викладених у «Правилах експлуатації та типових нормах належності вогнегасників». Ці правила були затверджені Міністерством юстиції України 23 лютого 2018 року за № 225/31677 і містять вказівки щодо кількості вогнегасників, необхідної для застосування, з огляду на розміри приміщень та категорії пожежної небезпеки.

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

У галузі матеріалознавства в Україні спостерігається стійке зростання зацікавленості в швидкорізальних сталях. Це пояснюється як потребами широкомасштабного промислового виробництва, так і збільшенням попиту на вироби високої унікальності. Економічна цінність швидкорізальних сталей визначається витратами на виробничий процес та вартістю вихідної сировини. Очікування щодо тенденцій на ринку взаємопов'язані з розвитком національної промисловості в широкому спектрі. Одним з ключових факторів, що формують цінову стратегію у даній сфері, є вартість легувальних елементів. Особливу увагу в цьому контексті заслуговують такі елементи, як молібден, вольфрам, кобальт, ванадій та нікель. Нинішні політичні та економічні умови в державі не сприяють послабленню цінових викликів.

Експертиза з боку Державної служби статистики вказує, що загальний ринок інструментальних сталей у межах держави досягає об'єму в 4,8 тисячі тонн, що у грошовому еквіваленті становить 56 мільйонів гривень щорічно. З цього обсягу, частка інструментальних сталей становить 4,4 тисячі тонн або 44 мільйони гривень, у той час як швидкорізальні сталі займають 0,4 тисячі тонн, або 12 мільйонів гривень на рік. Враховуючи експортні обсяги, загальний ринок інструментальних сталей за останні кілька років оцінюється у діапазоні 20-25 тисяч тонн.

У зв'язку зі зростанням потреб у виробі машинобудівної галузі на національному та світовому рівнях, а також завдяки економічному прогресу України, спостерігається збільшення вимог до швидкорізальних сталей. Динаміка розвитку внутрішньої економіки та відкриття нових ринків безпосередньо стимулює підвищений інтерес до цього сегмента металургійної продукції.

В Україні, ключову роль у забезпеченні ринку інструментальними сталями відіграють заводи ДСС. Значно зменшення імпорту з росії, особливо від таких виробників як "Іжсталь" та "Електросталь", спостерігається внаслідок геополітичних змін, що призвело до їх майже повної відсутності на українському ринку. Водночас, відзначається зростання імпорту сталевих продукцій з Китаю, яка, хоч і приваблює споживачів низькою ціною, часто не відповідає вимогам українських стандартів та не може похвалитися довговічністю.

Ріст активності індійських корпорацій на ринку України стає все більш помітним, оскільки вони прагнуть розширити свою присутність у Східноєвропейському регіоні. Незважаючи на це, відсутність належних складських потужностей і тривалий логістичний ланцюг, що розтягується на період у 45 днів, накладає обтяження на конкурентні переваги цих підприємств. Також не слід ігнорувати посилення присутності продукції з В'єтнаму та Об'єднаних Арабських Еміратів на українському ринку. Важливо підкреслити, що імпортована сировина становить близько 65% від загального обсягу, використовуваного для виробництва швидкорізальних сталей в Україні.

Захоплення ринкових секторів іноземними фірмами, які раніше були під контролем вітчизняних виробників, є тривожною тенденцією. Проте, українське виробництво може розгорнути свій потенціал на міжнародній арені за умови доступу до передових науково-технічних розробок та достатньої фінансової підтримки від інвесторів. У цьому аспекті, набуває значення розробка нових видів сталей, які не тільки відповідають сучасним технічним стандартам, але й виходять на ринок як економічно вигідні та малолеговані продукти, що забезпечують конкурентну перевагу.

5.2 Послідовний аналіз собівартості виконання науково-дослідної роботи

Проведено комплексний аналітичний огляд стратегічних напрямків застосування та ключових переваг для користувачів, пов'язаних із сучасними інноваційними розробками, які представлено у табл. 5.1. Визначено глобальне розуміння даної концепції та виокремлено основні сегменти ринку з потенціалом для входження, з акцентом на визначення конкретних цільових груп споживачів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка нової економнолегованої швидкорізальної, додатково легованої азотом	Виробництво різальних інструментів	Збільшення терміну служби інструментів, зменшення вартості виробництва.
	Авіаційна промисловість	Підвищення надійності деталей, оптимізація ваги конструкцій.

Здійснено детальний аналіз параметрів потенційного ринку, результати якого відображено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	Компанії "Interpipe", "ArcelorMittal Кривий Ріг" в Україні; "Voestalpine" (Австрія), "Sandvik Materials Technology" (Швеція) за кордоном

Кінець таблиці 5.2

Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільне зростання через постійний попит на інноваційні матеріали
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі вимоги до науково-технічного потенціалу, значні капіталовкладення
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання стандартів ISO, ASTM для металургії, сертифікація відповідно до українських норм ДСТУ та європейських EN

Проаналізовано та уточнено потенційні групи споживачів, визначено їхні основні потреби та розроблено набір фундаментальних вимог до товарів, які відповідають очікуванням кожної з цих груп, що відображено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Запит на високоміцний, зносостійкий інструментальний матеріал	Виробники ріжучого інструменту, машинобудівні підприємства	Індивідуальні замовлення для спеціалізованих потреб проти серійного виробництва	Висока продуктивність, тривалий термін служби, екологічність матеріалів

Завершено SWOT-аналіз середовища для впровадження інноваційного проекту, результати якого зібрано у табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – SWOT-аналіз проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Висока зносостійкість матеріалу. Економія витрат на заміну інструменту. Зменшення часу на обслуговування обладнання. Екологічність за рахунок використання азоту як легуючого елемента. Підвищення якості обробки деталей.	Висока вартість дослідження та розробки нової сталі. Потенційна складність у переробці сталі. Обмеження застосування в певних галузях. Необхідність сертифікації на новий тип матеріалу. Висока ціна кінцевого продукту на початковому етапі.
Можливості:	Загрози:
Розширення ринку за рахунок унікальних властивостей матеріалу. Залучення нових інвестицій у виробництво. Співпраця з великими промисловими компаніями. Розробка нових патентів. Вихід на міжнародний ринок.	Сильна конкуренція з боку вже встановлених брендів. Зміни в законодавстві, що регулюють використання матеріалів. Висока залежність від цін на сировину для виробництва сплаву. Технологічні ризики пов'язані з новизною матеріалу. Можливість появи більш нових і ефективних технологій.

Як початковий крок у формуванні ринкової стратегії було виконано роботу щодо стратегії проникнення на ринок, включаючи деталізацію цільових груп споживачів у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту), кг/рік	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Виробники інструментального обладнання, яким необхідні новітні матеріали	Висока, через постійний попит на інноваційні матеріали	15 000	Висока, з огляду на конкуренцію з існуючими матеріалами та новими розробками	Середня, потрібні значні інвестиції та науково-технічна база для розробки
Підприємства точного машинобудування, які вимагають високоякісної обробки деталей		5 000		

В ході аналізу проекту було розроблено Діаграму зацікавлених сторін (карту стейкхолдерів), яка візуалізує складну мережу взаємовідносин між учасниками проекту. Для чіткого представлення цих зв'язків, Діаграма структурована на три концентричні зони впливу, де розташовані всі зацікавлені сторони залежно від їх впливу на проект, причому імпульс впливу йде від ініціатора проекту. Внутрішнє коло символізує сегмент, що знаходиться під

прямим контролем ініціатора, що дозволяє застосовувати оптимізовані методики управління проектами для внутрішніх стейкхолдерів, як це зображено на рис. 5.1.

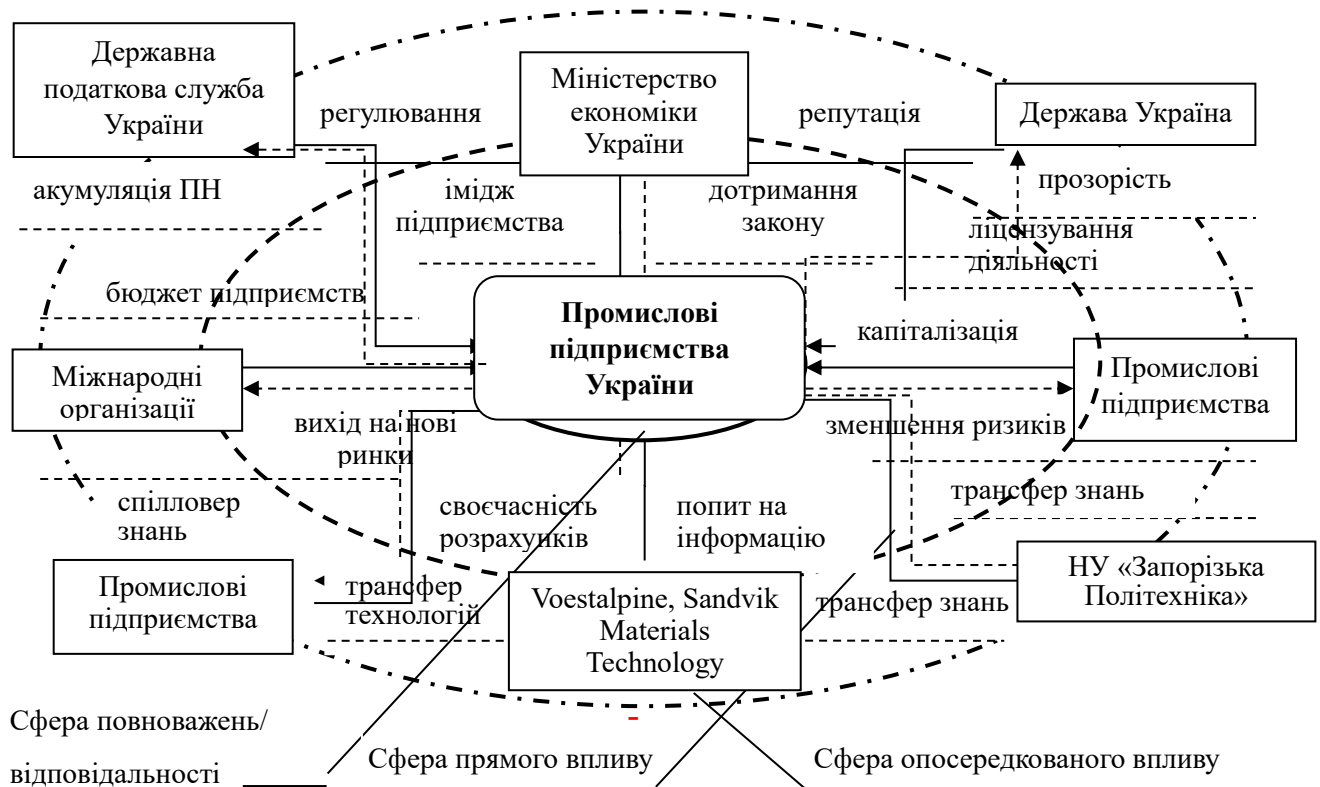


Рисунок 5.1 – Карта стейкхолдерів

З метою дотримання встановлених критеріїв було проведено розрахунок вартісних показників наукового проекту, спрямованого на розробку та аплікацію економічно ефективних швидкорізальних сталей нового покоління з пониженим вмістом таких легувальних елементів як молібден та вольфрам.

Ретельно було визначено фінансові витрати на оплату труда, враховуючи обсяг робочих годин, призначених для кожного учасника дослідження. Ці витрати включають у себе плановані кошти на заробітну плату для всіх рівнів наукових співробітників, що беруть участь у даній розробці (рис. 5.6).

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	11689	20	2337,8	14026,8	168321,6	37030,8
Старший науковий співробітник	1	10982	20	2196,4	13178,4	158140,8	34791,0
Молодший науковий співробітник	2	9633	20	1926,6	11559,6	277430,4	61034,7
Лаборант	2	6700	20	1340	8040	192960	42451,2
Разом	6	39004	-	7800,8	46804,8	796852,8	175307,6

Водночас була оцінена вартість матеріальних ресурсів, необхідних для проведення даних досліджень. Ця категорія затрат включає в себе витрати на придбання сировини, яка застосовуватиметься в ході наукових експериментів, та для виготовлення експериментальних зразків (рис. 5.7).

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Папір	—	3 блоки	120	360
Ручка	—	20 одиниць	15	300
Олівець	—	10 одиниць	10	100
Зразки	150	150 одиниць	145	21750

Кінець таблиці 5.7

Реактиви	—	25 одиниць	900	22500
Змінні лінзи	—	1 одиниці	3200	3200
Тара зразків	—	15 одиниць	50	750
Разом				48960

Здійснено оцінювання витрат на використанні комунальні послуги, які включають електрику та водопостачання, деталі яких відображено у табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Виробнича програма, одиниць	Обсяг послуг	Тарифи	Сума, грн
Електропостачання	—	500 кВт×год	2,64 грн/кВт×год	1320
Водопостачання	—	6 м ³	28,3 грн/м ³	169,8
Теплопостачання	—	4 Гкал	3777 грн/Гкал	15108
Охоронна система	—	1	1500 грн	1500
Утилізація реактивів	4	4	200 грн	800
Разом				10185

Обраховано щорічне амортизаційне відрахування для основних фондів обладнання. Розрахунок базується на первісній вартості цих фондів та прийнятій нормі амортизації, виходячи з п'ятирічного строку служби, що відображено в табл. 5.9.

Сформовано детальний кошторис витрат на проведення наукових досліджень, враховуючи зібрані дані, представлені у табл. 5.6-5.9, табл. 5.10.

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Кількість	Первісна вартість ОЗ	Вартість обладнання	Річні амортизаційні відрахування	Витрати на поточний ремонт у розмірі 2%
Металографічний мікроскоп	1	98287,0	98287,0	13760,2	1965,7
Світловий мікроскоп	2	125580,0	251160,0	35162,4	5023,2
Аналізатор металів та сплавів	2	941240,0	1882480,0	263547,2	37649,6
Комп'ютер	2	26547,0	53094,0	7433,2	1061,9
Принтер	2	14521,0	29042,0	4065,9	580,8
Разом	9	1206175,0	2314063,0	323968,8	46281,3

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати
Фонд заробітної плати, грн/рік	796853
ЄСВ, грн/рік	175308
Матеріальні витрати, грн/рік	48960
Вартість спожитих послуг, грн/рік	18898
Амортизація обладнання, грн/рік	323969
Поточний ремонт, грн/рік	46281
Виробнича собівартість, грн/рік	1410268
Адміністративні витрати, грн/рік	398426
Повна собівартість, грн/рік	1808695

5.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження результатів НДР

У процесі економічної оцінки використання різних феросплавів, включаючи такі компоненти як феровольфрам зі змістом заліза 30%, фероніобій з 25% заліза, феромолібден та феротитан, обидва з 30% і 35% заліза відповідно, береться до уваги комплексний підхід до вартості переробки. Даний комплекс, що становить 15% від загальної вартості, охоплює широкий спектр процесів: термічне оброблення, механічну обробку, лиття та інші пов'язані дії. На основі цих параметрів було розраховано вартість виробництва сплавів, зазначених у табл. 5.11:

- собівартість однієї тони (C_1) промислової серійної сталі Р6М5 становить: $C_1 = 295136,66$ грн/т;
- собівартість однієї тони (C_2) розробленої економнолегованої сталі Р2АМЗФЗБТ становить: $C_2 = 233711,00$ грн/т.

Таблиця 5.11 – Вартість сировини для виготовлення сплавів

Назва матеріалу	Ціна грн/кг	Вміст, % Р6М5	Ціна за 1 кг, Р6М5	Вміст, % Р2АМЗФЗБТ	Ціна за 1 кг, Р2АМЗФЗБТ
Залізо	8,5	Основа	8,50	Основа	8,50
Вольфрам	1 811,64	6	155,28	3	77,64
Молібден	1300	5	92,86	3	55,71
Ніобій	1980	-	-	2	56,57
Титан	165	-	-	1	2,36
Азот	11395,96	-	-	0,015	2,44
Разом		100	256,64	100	203,23

Вартісний аналіз розробленої економнолегованої сталі Р2АМЗФЗБТ виявляє її перевагу у вигляді зниження собівартості в порівнянні з промислово виробленою сталлю Р6М5. Даний показник визначається за формулою:

$$\Delta C = (C_1 - C_2) / C_1 \quad (5.1)$$

$$\Delta C = (295136,66 - 233711,00) / 295136,66 = 0,21 = 21 \%$$

Аналізуючи річний попит на дану сталь, встановлено, що для задоволення потреб виробників інструментального обладнання, зацікавлених в інноваційних матеріалах, потрібно 15000 кг/рік. Для підприємств точного машинобудування, що ставлять вимоги до високоякісної обробки деталей, необхідно 5000 кг/рік. Таким чином, загальний річний попит складає:

$$A_{\text{ст}} = 15000 + 5000 = 20000 \text{ кг/рік} \quad (5.2)$$

На основі цього попиту було розраховано мінімальну ціну товару, яка не включає податки, але забезпечує покриття витрат на науково-дослідні роботи протягом п'яти років, з умовою щорічного збуту виробленої продукції обсягом 20000 кг:

$$Ц = (C_{\text{ндр}} + C_2 \times A_{\text{ст}} + P + H) / A_{\text{ст}}, \quad (5.3)$$

де Ц – ціна товару;

$C_{\text{ндр}}$ – собівартість НДР згідно кошторису (табл. 5.10), грн;

C_2 – собівартість розробленої сталі, грн/кг;

P – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

H – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

$A_{\text{ст}}$ – обсяг замовлення, кг.

$$Ц = (1808695 + 233,71 \times 20000 + 934842,19 + 467421,09) / 20000 = 394 \text{ грн/кг}$$

Вартість продукції зі сталі Р6М5 була визначена на позначці 500 гривень за кілограм. При обсязі річного виробництва в 20 тонн, дохід протягом п'ятирічного періоду склав:

$$\Pi_{\text{пс}} = \Pi_{\text{пс}} \times (A_{\text{пс}} \times 5) - C_1 \times (A_{\text{пс}} \times 5) - P_{\text{пс}} - H_{\text{пс}}, \quad (5.4)$$

де $\Pi_{\text{пс}}$ – ціна виробів з промислової сталі Р6М5, грн/кг;

C_1 – собівартість промислової сталі Р6М5 грн;

$P_{\text{пс}}$ – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

$H_{\text{пс}}$ – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

$A_{\text{пс}}$ – обсяг замовлення промислової сталі Р6М5, кг.

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{пс}} &= 500 \times (20000 \times 5) - 295,14 \times (20000 \times 5) - 5902733,14 - 2951366,57 = \\ &= 11632234,57 \text{ грн} \end{aligned}$$

Завдяки запровадженню новітньої економічно-ефективної легованої сталі Р2АМЗФЗБТ, прогнозований дохід за п'ять років очікується наступним:

$$\Pi_{\text{чм}} = \Pi \times (A \times 5) - C_2 \times (A \times 5) - P - H, \quad (5.5)$$

де Π – ціна виробів з розробленої сталі, грн/кг;

C_2 – собівартість розробленої сталі грн;

P – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

H – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

A – обсяг замовлення розробленої сталі, кг.

$$\begin{aligned} \Pi &= 500 \times (20000 \times 5) - 233,71 \times (20000 \times 5) - 4674210,95 - 2337105,48 = \\ &= 19617628,9 \text{ грн} \end{aligned}$$

Отже, економічна вигода від імплементації інноваційної легованої сталі Р2АМЗФЗБТ упродовж п'ятирічного періоду буде:

$$E_k = \Pi - \Pi_{nc} = 19617628,9 - 11632234,57 = 7985394,28 \text{ грн}$$

Таким чином, зниження вартості виробництва нової сталі Р2АМЗФЗБТ на 21% у порівнянні з традиційною промисловою сталлю Р6М5 сприяє зниженню витрат на випуск продукції та збільшує прибуток від її продажу у 1,2 рази.

З огляду на полегшення процесу виробництва деталей, пропонується розглянути можливість збільшення річного обсягу замовлень з 20 до 30 тонн, при зниженні ціни з 500 до 400 гривень за кілограм. Цей крок може збільшити попит та приблизний річний економічний ефект становитиме 558841,74 гривень. Отримані додаткові кошти можуть бути спрямовані на модернізацію виробництва для задоволення зростаючого попиту.

5.4 Висновки за розділом 5

1. Виконано оцінку потенціалу ринку швидкорізальних сталей в Україні, який становить близько 25 тисяч тонн на рік та демонструє стійку тенденцію до зростання попиту на дану продукцію та перспективність її виробництва.

2. Визначено основні цільові групи споживачів розробленої сталі – виробники різального інструменту та підприємства точного машинобудування. Їх сумарний річний попит оцінений на рівні 20 тонн.

3. Розраховано вартість проведення НДР, яка складає 1,8 млн грн, що є прийнятним рівнем витрат на наукові дослідження даного масштабу.

4. Порівняльний аналіз показав, що собівартість розробленої сталі Р2АМЗФЗБТ на 21% нижча за традиційну сталь Р6М5. Таке значне зниження собівартості забезпечить конкурентну перевагу на ринку.

5. Економічний ефект від впровадження нової сталі за 5 років може сягати майже 8 млн грн при поточному попиті. Це свідчить про високу економічну ефективність проекту. Збільшення обсягів виробництва дозволить отримати додатковий прибуток.

6. Впровадження економнолегованої швидкорізальної сталі є економічно доцільним та перспективним рішенням, що забезпечить конкурентоспроможність продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних даних, який показав перспективність застосування азоту як легуючого елементу для підвищення властивостей швидкорізальних сталей. Встановлено, що додавання 0,01-0,1% N сприяє подрібненню зеренної структури, підвищенню дисперсності карбідів та поліпшенню механічних характеристик сталей.

2. Досліджено вплив легування азотом на структуру та властивості швидкорізальної сталі Р2АМЗФЗБТ в порівнянні зі сталлю Р6М5. Встановлено, що додавання 0,02 % N забезпечує формування дрібнішого аустенітного зерна після гартування та менший розмір карбідів.

3. Показано, що сталь Р2АМЗФЗБТ з 0,02% N демонструє більш високу твердість (на 1,5-2 HRC) та менший вміст залишкового аустеніту (на 5-10 %) після гартування і відпуску, ніж сталь Р6М5.

4. Визначено, що характеристики міцності та пластичності сталі Р2АМЗФЗБТ з азотом не поступаються показникам сталі Р6М5. Таким чином, азотовмісна сталь може бути альтернативою Р6М5, незважаючи на менший вміст дорогих легувальних елементів.

5. Економічний аналіз показав, що вартість виробництва 1 т сталі Р2АМЗФЗБТ на 21% нижча, ніж сталі Р6М5. За рахунок цього, економічний ефект за 5 років може сягати 8 млн грн.

6. Визначено оптимальний вміст азоту на рівні 0,02 %, який забезпечує найкраще співвідношення мікроструктури та механічних властивостей сталі Р2АМЗФЗБТ.

7. Доведена можливість створення ефективного аналога традиційної швидкорізальної сталі Р6М5 на основі малолегованої азотом сталі Р2АМЗФЗБТ, що має високий потенціал для застосування у виробництві різального інструменту.

8. Результати дослідження створюють передумови для розробки нового типу економічно вигідної швидкорізальної сталі, легованої азотом, що поєднує високі експлуатаційні характеристики з нижчою вартістю виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер // М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
2. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин // М.: Металлургия, 1977. – 407 с.
3. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: Справочник / И. Артингер // М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
4. Ernst, I.C. ESP4 and TSP4, a comparison of spray formed with powdermetallurgically produced cobalt free high-speed steel of type 6W-5Mo-4V-4Cr / I.C. Ernst, D. Duh // Journal of materials science. Vol. 39, 2004. – P. 6831-6834.
5. Гуляев, А. П. Теория быстрорежущей стали / А. П. Гуляев // МиТОМ. №11, 1998. – С. 27–32.
6. Chaus, A.S. New high-speed steel for the cast metal-cutting tool / A.S. Chaus et al. // Litiyo i Metallurgiya (Foundry production and metallurgy). № 2, 2019. – С. 110-117.
7. Скаков, М.К., Рахадиллов Б.К., Карипбаева Г.С., Манапбаева А.Б. Структурно-фазовое состояние быстрорежущей стали Р6М5 после термической обработки / М.К. Скаков, Б.К. Рахадиллов, Г.С. Карипбаева, А.Б. Манапбаева // ҚазҰУ хабаршысы. Физика сериясы. № 1 (48), 2014. – С. 53-59.
8. Wang, M. Effect of nitrogen on the austenite cooling transformation kinetics of a high-speed steel / M. Wang, Y. Wang, Y. Xing, L. Chen // Materials Science and Engineering A. Vol.438-440, 2006. – P. 1143-1145.
9. Luo, Y.-W. Influence of the Nitrogen Content on the Carbide Transformation of AISI M42 High-Speed Steels during Annealing / Y.-W. Luo, H.J. Guo, X.L. Sun, J. Guo // Scientific Reports. Vol. 8, 2018. – P. 1143-1145.
10. Hwang, K. C. Effects of alloying elements on microstructure and fracture properties of cast high speed steel rolls. Part I: Microstructural analysis / K.C.

Hwang, S. Lee, H.C. Lee // Materials Science and Engineering A. Vol. 254, 1998. P. – 282-295.

11. Boccalini, M. Solidification of high speed steels / M. Boccalini, H. Goldenstein // International Materials Reviews. Vol.46, No.2, 2001. – P. 92-107.

12. Pippel, E. Microstructure and Nanochemistry of Carbide Precipitates in High-Speed Steel S 6-5-2-5 / E. Pippel, J. Woltersdorf, G. Pöckl, G. Lichtenegger // Materials Characterization. Vol.43, 1999. – P. 41-55.

13. Serna, M. M. An Overview of the Microstructures Present in High-Speed Steel – Carbides Crystallography / M. M. Serna, E. R. B. Jesus, E. Galego, L. G. Martinez, H. P. S. Corrêa, J. L. Rossi // Materials Science Forum, 2006. – P. 48-52.

14. Kim, C.K. Effects of Alloying Elements on Microstructure, Hardness, and Fracture Toughness of Centrifugally Cast High-Speed Steel Rolls / C.K. Kim, J.I. Park, S. Lee, Y.C. Kim, N.J. Kim, J.S. Yang // Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 36A, 2005. – P. 87-97.

15. Luo, Y. Effects of Austenitizing Conditions on the Microstructure of AISI M42 High-Speed Steel / Y. Luo, H. Guo, X. Sun, M. Mao, J. Guo // Metals. Vol. 7, 2017. – P. 1-13.

16. Jiao, W. Effect of High Nitrogen Addition on Microstructure and Mechanical Properties of As-cast M42 High Speed Steel / W. Jiao, H. Li, H. Feng, Z. Jiang, J. Dai, H. Zhu, S. Zhang, M. Chu, W. Wu // ISIJ International. Vol. 60, 2020. – P. 564-572.

17. НПАОП 28.0-1.30-12. Правила охорони праці під час роботи з абразивним інструментом [чинний від 2012-11-26]. К.: Міністерство надзвичайних ситуацій України (МНС), 2012. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1879-12#Text>

18. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. [На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350; чинний від 2012-03-16]. К.: МНС України, 2012. – 37 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12#n16>

19. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення [На заміну СНиП 2.09.04-87; чинний від 2011-10-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 31 с.

20. СНиП 2.09.02-85* Производственные здания. С изменениями [Чинний від 1987-01-01]. ЦНИИпромзданий, 1987.

21. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. Зі змінами [Чинний від 2023-04-07]. К.: Міністерство внутрішніх справ (МВС), 2023.

22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [На заміну СНиП 2.04.05-91; крім розділу 5 та додатка 22; чинний від 2014-01-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2013. – 149 с.