

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 проєкту (роботи)

Магістр
(ступінь вищої освіти)

на тему: «Ніобій та титан, як замітники вольфраму та молібдену в сталі типу Р6М5»

(назва теми)

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

Освітня програма (спеціалізація)
Прикладне матеріалознавство

Антипов О.А.
(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

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

Рецензент: _____
(ПРИЗВИЩЕ 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 Олександр Анатолійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Ніобій та титан, як замітники вольфраму та молібдену в сталі типу Р6М5

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 проєкту (роботи):

Механічні характеристики та елементний склад швидкорізальних сталей. Огляд впливу легувальних елементів на мікроструктурні та механічні характеристики цих сталей.

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

Огляд застосування швидкорізальних сталей; вибір матеріалів та методології дослідження; оцінка структурних та механічних параметрів сталі після застосування різноманітних теплових процесів; засоби забезпечення безпеки праці та дії у кризових ситуаціях; визначення вартісної ефективності проекту.

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

кількість слайдів – 8, з них: титульний лист – 1; Таблиці з даними про фізико-механічні характеристики – 5; 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 дипломного проєкту. 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 О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 77 с, 26 табл, 8 рис, 1 додаток, 28 джерел.

У роботі досліджено вплив легувальних елементів ніобію та титану на властивості швидкорізальної сталі. Розроблено склад та технологію виготовлення нової економно легованої сталі РЗМЗФ2БІТ зі зниженим вмістом вольфраму та молібдену. Встановлено, що розроблена сталь за ключовими характеристиками перевершує стандартну сталь Р6М5. Її впровадження дозволяє знизити собівартість на 22 % та підвищити прибуток у 1,7 рази.

ШВИДКОРІЗАЛЬНА СТАЛЬ, НІОБІЙ, ТИТАН, ВОЛЬФРАМ, МОЛІБДЕН, ЛЕГУВАННЯ, МІКРОСТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ТВЕРДІСТЬ, ЧЕРВОНОСТІЙКІСТЬ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Об'єкт дослідження – розробка нової марки економнолегованої швидкорізальної сталі із зниженим вмістом вольфраму та молібдену.

Предмет дослідження – вплив легувальних елементів ніобію та титану на структурні та механічні характеристики швидкорізальної сталі.

Мета роботи – розробити оптимальний склад і технологію виготовлення нової економнолегованої швидкорізальної сталі на основі ніобію та титану.

Методи дослідження – виготовлення експериментальних плавок сталі, металографічний аналіз, визначення механічних властивостей, порівняння зі стандартною сталлю Р6М5.

Рекомендації щодо застосування результатів дослідження – здобуті дані можуть бути корисними для удосконалення складу та процесів виготовлення швидкорізальних сталей.

Значення роботи та висновки – у ході дослідження розроблено склади з вмістом вольфраму та молібдену, що не перевищує 3.3% кожного, які мають вторинну твердість та червоностійкість на рівні 66 та 60 HRC відповідно, та характеризуються границею міцності у діапазоні 3400-3500 МПа.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	8
1 Огляд літературних джерел.....	9
1.1 Огляд та характеристики швидкорізальних сталей.....	9
1.2 Основні аспекти технологічних процесів виробництва інструментів з швидкорізальної сталі.....	16
1.3 Постановка мети та задач дослідження.....	20
2 Матеріали та методи дослідження.....	22
2.1 Виготовлення лабораторної партії сталі.....	22
2.2. Виготовлення зразків для дослідження мікроструктури.....	23
2.3 Принцип дії РЕМ.....	25
2.4 Визначення механічних властивостей.....	27
3 Визначення структурних та механічних характеристик сталі після різних видів термічного оброблення.....	28
3.1 Структура литого металу.....	28
3.2 Дослідження природи карбідів.....	29
3.3 Властивості деформованої сталі в відпаленому стані.....	30
3.4 Характеристики сталі після гартування.....	33
3.5 Властивості сталі після відпуску.....	35
3.6 Висновки до розділу 3.....	38
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	40
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	40
4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці та пожежної безпеки.....	42
4.2.1 Захист працівників у робочій зоні.....	42
4.2.2 Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження.....	45
4.2.3 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці.....	47

	7
4.2.4 Заходи з пожежної безпеки.....	48
5 Економіко-організаційна частина.....	50
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	50
5.2 Послідовний аналіз собівартості виконання науково-дослідної роботи.....	51
5.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження результатів НДР.....	59
5.4 Висновки до розділу 5.....	63
Висновки.....	65
Перелік джерел посилання.....	67
Додаток А	

ВСТУП

Завдяки постійному вдосконаленню виробничих процесів, застосуванню передових технологій та впровадженню обладнання високої продуктивності, а також через розробку нових матеріалів, які складно обробляти, значно зросли вимоги до довговічності та якості різального інструменту. Ефективне використання як стандартного обладнання, так і автоматизованих систем, часто залежить від якості інструментів, з якими вони оснащені. Прогрес у сфері машинобудування значною мірою корелює з технічними досягненнями у виробництві інструментів. Тривалість служби інструментів, а також кількість необхідних періодичних доопрацювань, безпосередньо впливають на кінцеву вартість виготовлених компонентів.

З огляду на зростаючий дефіцит ключових легувальних елементів, таких як вольфрам, молібден, кобальт та ванадій, набуває актуальності пошук шляхів створення більш економічно легованих швидкорізальних сталей, альтернативних сталі Р6М5, яка використовується для обробки за звичайних швидкостей різання вуглецевих та помірно легованих конструкційних сталей з міцністю 900-1000 МПа (НВ 150-200), а також нержавіючих сталей.

Існуючі на ринку в обмеженій кількості малолеговані швидкорізальні сталі типу Р3М3Ф2 зазвичай поступаються за характеристиками сталі Р6М5, дозволяючи досягнути приблизно лише 80 % її продуктивності.

Зниження вмісту вольфраму та молібдену на 2-3 % у порівнянні зі сталлю Р6М5, за умови досягнення аналогічного рівня експлуатаційних властивостей, може привести до помітної економії коштів, враховуючи високу вартість цих легувальних компонентів.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Огляд та характеристики швидкорізальних сталей

Теплостійкі та тверді сталі, здатні ефективно зберігати свої властивості при високих температурах, класифікуються як швидкорізальні і знаходять широке застосування у виробництві інструментів для різання. Ці матеріали відрізняються відмінною теплостійкістю в діапазоні 500-650 °C – показник, що коливається в залежності від їх складу та обробки, а також поєднують у собі високий рівень твердості, досягаючи показників у 70 HRC. Вони мають зносостійкість при високих температурах і ефективно протидіяти пластичній деформації. Впровадження швидкорізальних сталей дозволило істотно підвищити ефективність різання – швидкість обробки зростає у 2-4 рази, а термін служби інструментів з цих сталей збільшується в 10-40 разів порівняно з інструментами, виготовленими зі сталей, низьких по теплостійкості. Ці переваги найбільш виразні при різанні з високою швидкістю, що веде до нагрівання різальної частини, або при низькій швидкості, але під впливом високих тисків [1].

Згідно даних зарубіжних виробників, приблизно половина всього різального інструменту була виготовлена з швидкорізальних сталей [2]. Різальні характеристики цих матеріалів залежать від багатьох параметрів, серед яких ключове місце займає хімічний склад (табл. 1.1).

Швидкорізальні сталі зі стандартною стійкістю до високих температур традиційно включають до свого складу максимум 1,0 % вуглецю. Ці сплави розрізняються за рівнем присутності вольфраму. Вольфрамовмісні швидкорізальні сталі характеризуються вмістом вольфраму в діапазоні від 9 до 18 %, тоді як вольфрамомолібденові аналоги мають лише 6...8 % цього елемента. Сталі, що характеризуються підвищеною теплостійкістю, мають у своєму складі до 1,5% вуглецю та додатково включають вольфрам, молібден, хром, кобальт і ванадій у різноманітних комбінаціях [3].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад деяких марок швидкорізальної сталі згідно ГОСТ 1926-73 [4]

Марка сталі	Вміст елементів, мас. %						Твердість	
	C	Cr	W	Mo	V	Co	Відпал, HB	Гартування, HRC
P6M5	0,80- 0,88	3,8- 4,4	5,5- 6,5	5,0- 5,6	2,0- 2,5	-	255	63
P6M5K5	0,82- 0,90	3,8- 4,3	6,0- 7,0	4,8- 5,8	1,7- 2,2	4,8- 5,3	269	64
P6M5Ф3-МП	1,25- 1,35	3,8- 4,3	5,7- 6,3	3,1- 3,7	2,5- 3,0	< 0,5	269	65
2P6M5Ф3K10	1,2- 1,3	3,2- 3,5	6,5- 6,8	4,8- 5,8	2,5- 3,0	4,8- 5,3	285	64

Функціональність різального інструменту, виготовленого з швидкорізальної сталі, обумовлюється ключовими характеристиками матеріалу, серед яких особливо важливими є твердість, міцність, зносостійкість та теплостійкість. Твердість вказує на здатність інструменту протистояти контактним навантаженням, які з'являються на різучій кромці під час роботи, та забезпечує підвищену зносостійкість і межу витривалості. Однак, ця залежність не є прямолінійною, адже на неї впливає поведінка карбідних фаз та зміни у міцності та пластичності матеріалу.

Збільшення твердості також веде до підвищення якості обробленої поверхні, що отримана внаслідок шліфування та полірування, й знижує прилипання до неї металу, який обробляється. Висока твердість підтримується навіть під час короткотривалих температурних впливів під час використання інструмента, оскільки зниження міцності сталі, спричинене розпадом мартенситу та коагуляцією карбідів, відбувається з подібною інтенсивністю на первинних етапах нагрівання в сталях з різним рівнем твердості. Важливо зауважити, що твердість не залежить від розміру зерна, розподілу карбідів та

напружень, які істотно впливають на такі механічні властивості, як міцність та пластичність [5].

Теплостійкість є визначальною для здатності інструментальних матеріалів підтримувати необхідну для різання чи деформування структуру та властивості при температурних варіаціях, що відбуваються в робочій кромці. Ця характеристика також критично важлива з технологічного погляду, оскільки вона визначає здатність сталі зберігати свою структуру під час термічних процесів, таких як шліфування чи заточування.

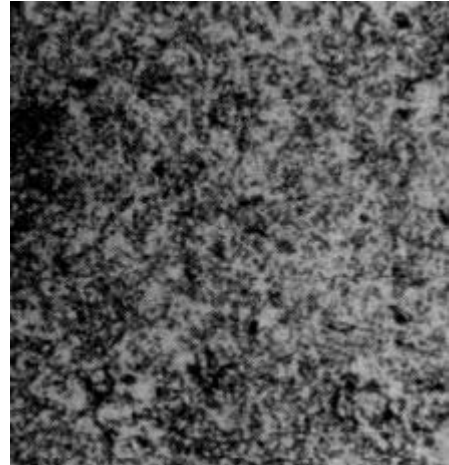
Ключові характеристики швидкорізальних сталей, що визначають їх ефективність у виготовленні різального інструментарію, є нерозривно пов'язані з їх хімічним складом та структурою. Ці матеріали вирізняються завдяки легувальним елементам, які значно підвищують їх теплостійкість – найважливішою серед них є вольфрам, а також його аналог – молібден. Вони є критичними для забезпечення високої опірності до температур, що впливають на ріжучий інструмент під час експлуатації. Додавання ванадію та кобальту також сприяє підвищенню теплостійкості.

Відповідно до класифікації, швидкорізальні сталі належать до категорії карбідних, а точніше – ледебуритних. Після процесу відпалу, їхня фазова структура складається з легованого фериту та карбідів M_6C , $M_{23}C_6$, MC , M_3C . Серед них, карбід M_6C відіграє домінуючу роль, адже він містить розчинений ванадій. Хром переважно розчиняється у фериті, тоді як вольфрам (або молібден) та ванадій містяться у карбідах [6].

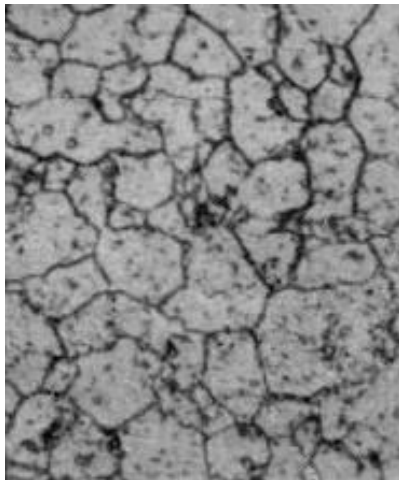
Структура литої швидкорізальної сталі характеризується наявністю складної евтектики, яка зовні схожа на ледебурит і локалізується по границях зерен, як це демонструється на (рис. 1.1, а). Проте, ця евтектика зазнає подрібнення в результаті гарячої механічної обробки. В сталі, яка піддалася інтенсивній деформації, як видно на (рис. 1.3, б), евтектичні та вторинні карбіди рівномірно розподілені у основній матриці, яка після відпалу приймає структуру схожу на сорбітоподібний перліт [7].



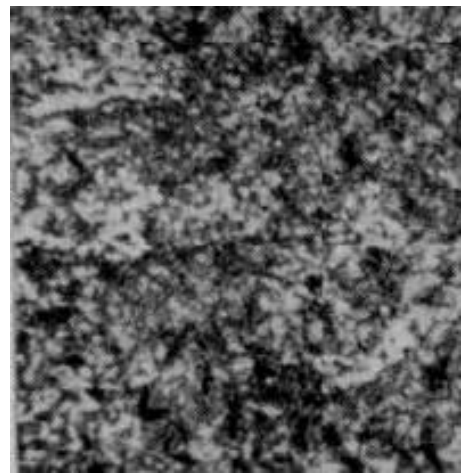
а



б



в



г

а – ледебурит після лиття; б – деформована й відпалена сталь; в – сталь після гартування; г – сталь після гартування та відпуску

Рисунок 1.1 – Мікроструктура швидкорізальних сталей, x500 [7]

Структура литої швидкорізальної сталі характеризується наявністю складної евтектики, яка зовні схожа на ледебурит і локалізується по границях зерен, як це демонструється на (рис. 1.1, а). Проте, ця евтектика зазнає подрібнення в результаті гарячої механічної обробки. В сталі, яка піддалася інтенсивній деформації, як видно на (рис. 1.3, б), евтектичні та вторинні карбіди рівномірно розподілені у основній матриці, яка після відпалу приймає структуру схожу на сорбітоподібний перліт [8].

Зі зростанням частки вольфраму в структурі сталі спостерігається зміна вмісту ванадію. Його концентрація досягає піку, збільшуючись майже удвічі, коли вміст вольфраму зростає з 6 до 13 %. Це пояснюється розчиненням значної кількості карбідів M_6C , які включають ванадій. З подальшим підвищенням рівня вольфраму спостерігається зниження концентрації ванадію в мартенситі через зменшення його присутності у карбіді M_6C та частковий перехід у карбід MC . Ці зміни в хімічному складі мартенситу впливають на термічну стійкість та інтенсивність дисперсійного гартування. Дисперсійне гартування проходить з однаковою інтенсивністю у сталях, що містять 12-20 % вольфраму. Однак у сталях з 12-13 % вольфраму цей процес відбувається завдяки вищій концентрації ванадію в мартенситі, тоді як у сталях з 18-20 % вольфраму – це зумовлено вмістом самого вольфраму [9].

Молібден та вольфрам, які є хімічно схожими елементами, роблять подібний вплив на структурні зміни та основні характеристики матеріалів. Проте в молібденових сталях температура переходу $\alpha \leftrightarrow \gamma$ трохи нижча в порівнянні з вольфрамовими.

Кристалізація обох типів сталей відбувається через перитектичну реакцію після формування δ -(γ)-фази. Тим не менш, температурний діапазон цієї реакції у молібденових сталях є ширшим і відбувається більш комплексно, що призводить до збереження меншої кількості рідкої фази до закінчення перетворення. Залишкова рідина кристалізується при нижчій температурі, приблизно на 50 °C нижче, утворюючи тоншу евтектику, яка забезпечує дисперсніші карбіди в деформованій молібденовій сталі, що позитивно впливає на механічні властивості.

Молібден зазвичай присутній у всіх типах швидкорізальних сталей у концентраціях від 0,3 до 1,0%. Це зумовлено використанням у шихті як відходів сталей, що містять вольфрам та молібден, так і феровольфраму з домішками молібдену. Додавання молібдену впливає на характеристики сталі: прикладом, введення 1,0% Мо здатне підвищити ударну в'язкість на 15-20% та міцність на 5-8%, не впливаючи на теплостійкість матеріалу [10].

Хром є ключовим легувальним компонентом у швидкорізальних сталях, а також в інших середньо- та високолегованих інструментальних сталях, де його роль виявляється багатогранною та складною. У швидкорізальних сталях, що зазнали процесу відпалу, хром ідентифікується у феритній структурі та у карбіді M_6C , а також утворює карбід $M_{23}C_6$. Цей останній карбід має здатність повного розчинення при відносно низьких температурах гартування, що сприяє насиченню твердого розчину вуглецем і хромом без впливу на розмір зерна. Завдяки здатності до більш повного розчинення карбиду M_6C в аустеніті, хром у концентраціях 3,5-4,0 % гарантує необхідні властивості загартовуваності та прогартовуваності.

Окрім цього, хром посилює карбідну неоднорідність, а вплив 1 % Cr можна порівняти з впливом 3,0-4,0 % W через меншу атомну масу хрому. Тому визначення оптимального вмісту хрому залежить від присутності вольфраму у сплаві. Наприклад, у сталі з 18 % W і 0,7-1,0 % V, необхідні показники загартовуваності та прогартовуваності досягаються при 3,8-4,4 % Cr, тоді як у сталі з 12-13 % W — при 3,2-3,6 % Cr. У цій останній категорії сталі присутність карбідів M_6C з хромом є меншою, і в сталі з 12 % W спостерігається менший вміст вольфраму в карбіді M_6C , що полегшує його розчинення під час нагріву для процесу гартування.

Ванадій впливає на властивості швидкорізальних сталей, таких як P18, P12, P6M5, визначально формуючи їх характеристики. Зміст ванадію в межах 1,8-1,9 % відзначається наявністю обмеженої кількості карбиду MC, а більша частина його локалізується у карбідах $M_{23}C_6$ і M_6C . Під час термічної обробки, коли ці карбіди розчиняються, ванадій переходить до γ -фази. У результаті відпуску він кристалізується у формі карбиду MC, що позитивно впливає на другорядну твердість та теплову стійкість сталі, однак знижує показники ударної в'язкості. Це також спричиняє підвищення оброблюваності шліфуванням в стані після гартування порівняно зі сталлю після відпуску.

Підвищення вмісту ванадію до 4,0-5,0 % спричиняє значне збільшення присутності карбіду МС. Цей фактор відіграє двояку роль: з одного боку, істотно підсилює зносостійкість сталі, а з іншого – призводить до зниження границі міцності, ударної в'язкості та погіршення оброблюваності шліфуванням. Такий вміст ванадію вимагає ретельної оптимізації термічного режиму для досягнення збалансованих експлуатаційних характеристик [11].

Вплив кобальту на характеристики швидкорізальних сталей є надзвичайно вагомим. Він є ключовим легувальним елементом, який суттєво збільшує теплостійкість матеріалу до температур 645-650 °С та підвищує вторинну твердість до показників 67-70 HRC. Сталі, що містять кобальт, відрізняються підвищеною теплостійкістю, що призводить до зниження температури ріжучої кромки інструментів на 30-70 °С у порівнянні зі сталями без кобальту за ідентичних умов обробки.

Кобальт відрізняється від таких елементів, як вольфрам, молібден, ванадій та хром, оскільки він не утворює карбіди. Цей елемент присутній у структурі α - та γ -фаз, а також у складі карбіду М₆С, де він займає позиції атомів заліза. Внаслідок цього, кобальт має унікальний вплив на властивості швидкорізальних сталей, який є значно складнішим порівняно з іншими легувальними елементами. Він посилює стабільність твердого розчину під час нагрівання, підвищує температуру початку $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення, що спостерігається з ростом його концентрації до 5,0-6,0 % Со. Кобальт сприяє ефективнішому вивільненню вольфраму та молібдену з мартенситу під час відпуску, знижуючи їх розчинність у α -фазі, що веде до підвищення дисперсійного гартування, вторинної твердості та теплопровідності, хоча може дещо знижувати міцність та пластичність матеріалу.

Кобальт також визначає деякі технологічні властивості швидкорізальних сталей. Зокрема, зі зростанням його вмісту в сталях знижується гаряча пластичність, що також сприяє збільшенню знеуглецювання при термічній обробці в печах та соляних ваннах.

Додавання кобальту до складу сприяє збільшенню теплостійкості до 645-650 °С завдяки підвищенню температурного порогу $\alpha \leftrightarrow \gamma$ - перетворення та ускладненню процесу коагуляції [12].

1.2 Основні аспекти технологічних процесів виробництва інструментів з швидкорізальної сталі

Виробництво інструментів із швидкорізальних сталей починається з постачання матеріалу у формі прутів круглої, прямокутної та квадратної форм перетинів, а також різноманітних форм заготовок і розмірів. Заготовки з швидкорізальної сталі традиційно створюються методами кування, гарячої прокатки чи холодного волочіння, за якими зазвичай слідує процес шліфування, в результаті якого отримують так звану сталь-серебрянку. Якість швидкорізальної сталі, що була виготовлена за допомогою лиття, визначається стандартами ДЕСТ 19265-79 [13] та ТУ 14-1-3714 [14], в той час як якість сталі, виробленої порошковою металургією, регулюється ДЕСТ 28393-89 [15].

Технічні характеристики швидкорізальних сталей включають вимоги щодо твердості матеріалу на етапі постачання, яка має варіюватися між НВ 255 для Р6М5 і НВ 285 для Р10М4К10Ф3. Продукція у вигляді прутків має бути виконана без видимих викривлень або спіралеподібності, а на їх зовнішній поверхні не повинно бути присутніми розкатаних чи розкутих бульбашок, тріщин та інших дефектів. Шліфована зовнішня поверхня сталі, відома як серебрянка, має бути ідеально чистою без будь-яких недоліків. В структурі металу не має бути стрічкових карбідних включень та їх значних скупчень, що можуть спричинити ліквацію. Такі дефекти є катастрофічними, оскільки вони можуть призвести до утворення тріщин під час процесу гартування і роблять сталь непридатною для виготовлення інструментів із складним профілем та різьбленням.

Дозволена верхня межа глибини шару без вуглецю на зламі виробів з гарячекатаної та кованої сталі має бути не більшою ніж сума 0,5 мм та 1% від діаметра цих виробів. Щодо смугової сталі, визначення глибини такого шару проводиться на її широкій стороні. Проте у випадку шліфованих сталевих прутків, так званих "серебрянок", наявність знеуглецьованого шару є неприпустимою.

Оцінка карбідної неоднорідності в металі виражається через карбідну зернистість, яка показує міру подрібненості та однорідності розподілу карбідів у масі сталі. Відповідно до ДЕСТ 19265-73, цей показник вимірюється в балах (рис. 1.2, 1.3).



Рисунок 1.2 – Карбідна неоднорідність (1 бал) сталі P6M5, x100 [16]

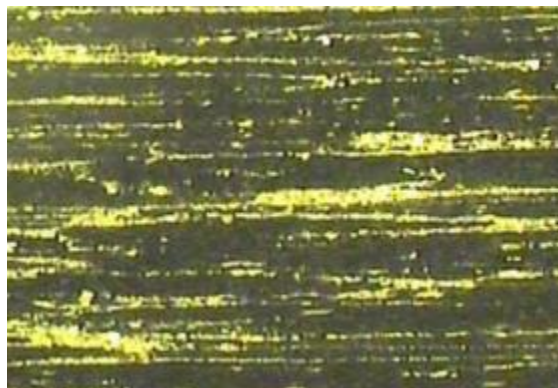


Рисунок 1.3 – Карбідна неоднорідність (6 бал) сталі P6M5Φ, x100 [16]

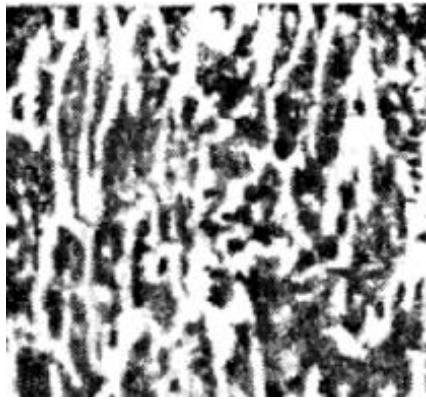
При балі № 1 спостерігається найдрібніше та найбільш рівномірне розміщення карбідів, тоді як бал № 10 свідчить про найменш однорідний, смугастий розподіл карбідів у сталі, що вказує на наявність значних карбідів.

Для виготовлення різального інструменту з деталізованим тонким профілем рекомендовано використовувати сталь з карбідною неоднорідністю від 1 до 3 балів. Кутові фрези, прорізні, кінцеві, фасонні різці, зенкери та розгортки виготовляють із застосуванням сталі, карбідна неоднорідність якої не перевищує 4 бали. Ж для виробництва більш грубих і простих інструментів, як-то різці, вдаються до сталі з балом карбідної неоднорідності 5 та 6. Сталь із більшою карбідною неоднорідністю, що перевищує 6 балів, непридатна для створення інструментів і вимагає додаткової пластичної обробки, такої як кування чи штампування, перед подальшим використанням [17].

Зі зростанням вмісту карбідів спостерігається ущільнення евтектичної сітки (ледебуритної структури), а також розширення розмірів виливка. Після проведення гарячої деформації, спостерігається, що розміри та розподіл дрібних карбідних зерен залишаються нерівномірними. Обмеження відносяться також до ступеня можливої гарячої деформації. На рис. 1.4 представлено зразки карбідної неоднорідності в інструментальних сталях, що містять карбіди типів $M_{23}C_6$, M_6C та MC .

З ростом загального об'єму карбідів збільшується також розмір карбідних зерен, роздроблених під час гарячої деформації. Існує чимало технологічних прийомів, які використовуються для ліквідації евтектичної карбідної сітки та зменшення розміру карбідних зерен, наприклад, за допомогою ультразвукового оброблення.

Вплив деформації та відповідних термічних обробок може призвести до утворення крупніших карбідних зерен, що є небажаним для певних застосувань. Такі зерна можуть знижувати міцність матеріалу та його зносостійкість. За допомогою оптимізації технологічних процесів, як-от контрольований відпал, можна досягти більш однорідного розподілу карбідних фаз та забезпечити кращі експлуатаційні характеристики сталі.



а



б



в



г

а – сітка карбідів; б – широкі карбідні рядки; в – карбідні рядки при найпоширеніших ступенях обтиснення; г – тонкі рядки дрібних карбідів

Рисунок 1.4 – Розподіл карбідів у швидкорізальній сталі по мірі збільшення ступеню деформації, х60

Під впливом гартування, у швидкорізальних сталях спостерігається зростання опору до зношування. Для прикладу, вміст карбідів може збільшитися у 3 рази, що сприяє підвищенню розмірів карбідів та зміні їхньої конфігурації. Специфічні умови формування карбідів в процесі відливу, включно з висотою заливки та швидкістю кристалізації, визначають особливості розподілу та розміри карбідних утворень. Дослідження розмірів карбідів в швидкорізальних сталях показують, що введення легувальних елементів, таких як ванадій та титан, сприяє формуванню більш тонкої

структури карбідної сітки, що благотворно впливає на зносостійкість матеріалу.

З метою оптимізації структури швидкорізальних сталей, зокрема зниження розмірів карбідних утворень, застосовують відпал, гартування та відпуск. Однак, під час відливки, зменшення розмірів карбідів може бути обмеженим через збільшення маси відливання. Так, при виготовленні виливок масою від 100 до 1500 кг, відбувається формування дуже широкої карбідної сітки, особливо в середніх зонах відливання, що може негативно впливати на механічні властивості матеріалу.

Таким чином, ключовим аспектом при виробництві швидкорізальних сталей є ретельна регуляція розміру та розподілу карбідних зерен, а також контроль за технічними параметрами обробки, щоб забезпечити оптимальну структуру для виконання специфічних вимог.

1.3 Постановка мети та задач дослідження

На основі проведеного аналізу літературних джерел виявлено актуальність зниження собівартості виробництва швидкорізальних сталей без втрати їхніх якісних характеристик та визначено потребу у розробці нових сплавів з альтернативними легувальними елементами.

Таким чином, метою дослідження є розробка нових марок швидкорізальної сталі з використанням ніобію та титану як замінників традиційних легувальних елементів – вольфраму та молібдену. Це повинно сприяти зниженню вартості матеріалів та енергії при виробництві, а також підвищенню конкурентоспроможності продукції.

Основні завдання дослідження:

1. Дослідити вплив введення ніобію та титану на структурні характеристики швидкорізальної сталі та визначити оптимальні пропорції цих елементів у сплаві.
2. Розробити технологічний процес виробництва швидкорізальної сталі з ніобієм та титаном, визначити та оптимізувати параметри термічної обробки.
3. Провести порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик отриманої сталі зі сталлю марки Р6М5, зокрема оцінити зносостійкість, міцність, твердість і червоностійкість.
4. Оцінити економічний ефект від заміни традиційних легувальних елементів на ніобій та титан, включаючи аналіз зміни вартості вихідної сировини та енергетичних витрат.
5. Дати рекомендації щодо правил та технік охорони праці при роботі з швидкорізальними сталями.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Виготовлення лабораторної партії сталі

Сталь виготовляли методом оплавлення у відкритих індукційних печах на 50 та 100 кг з основною футеровкою. 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 напряду з печі у форми квадратного 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 плавов

Марка сталі	Маса зливка, кг	Масова доля, %							
		C	W	Mo	V	Cr	Nb	Ti	домішки
РЗМЗФ2БІТ	20	1,18	3,05	2,82	1,96	4,10	1,26	0,24	1,057
Р6М5	20	0,83	6,10	5,20	1,95	3,80	-	-	0,845
РЗМЗФ2БІТ	100	1,10	3,00	2,82	1,98	4,37	1,24	0,20	0,982
Р6М5	100	0,82	6,15	5,50	1,90	3,90	-	-	0,622

Злитки проходили відпал при температурі 850 ± 10 °С. Злитки по 20 кг кували на молоті з масою падаючої частини 20 кН у прутки перетином 30х30 мм; злитки по 100 кг кували на молоті з масою падаючої частини 50 кН у прутки діаметром 45 мм. Охолоджені прутки залишали в піску, а потім піддавали відпалу при температурі 850 ± 10 °С.

2.2 Виготовлення зразків для дослідження мікроструктури

Мікроскопічний аналіз вимагає ідеально підготовлених шліфів, адже від їх якості залежить точність інтерпретації мікроструктурних характеристик. Оптимальні для досліджень є зразки простих геометричних форм, таких як куб або циліндр. Щоб уникнути пошкодження полірувального матеріалу під час обробки, краї зразків заточують. Стандартні розміри зразків становлять діаметр або довжину сторони квадрата 10-20 мм та висоту 10-15 мм. Вирізки зразків здійснюються як на латках, так і на фрезерних чи рубальних машинах. Для металів та сплавів з високою твердістю та складною обробкою використовують стандартні різальні інструменти з твердих сплавів, або застосовують тонкий шліфувальний круг чи електроіскрове вирізання. Для крихких матеріалів зразки відбирають за допомогою алмазного різального інструменту. Під час механічної обробки важливо запобігти перегріву зразка, щоб уникнути змін у структурі. Процес створення мікрошліфів включає в себе кілька етапів:

- грубе вирівнювання поверхонь розлому чи зрізу;
- детальне шліфування;
- завершальне полірування.

Шліфування проводиться на абразивних дисках, при цьому необхідне інтенсивне охолодження. Завершується процес лише після досягнення ідеально рівної поверхні шліфу. Використання абразивного паперу різних номерів залежить від характеристик матеріалу, що оброблюється.

Процес полірування поверхні здійснюється з метою усунення мікронерівностей, залишених від шліфування, та інших незначних поверхневих дефектів. Для цього використовується спеціалізований полірувальний апарат, обладнаний диском, обтягненим матеріалами як фетр, сукно або оксамит. Під час поліровки диск зволожують розчином, який містить

воду з додаванням абразивних часток, таких як оксид алюмінію чи оксид хрому.

Для візуалізації мікроструктури матеріалу створюють рельєфність або фарбують відмінні структурні елементи різними кольорами, що зазвичай відбувається за допомогою хімічного травлення. Кислота, яка використовується у травленні, спочатку реагує на границі фаз та зерен, оскільки це найбільш дефектні ділянки, які після травлення перетворюються на улоговини. В результаті розсіювання світла такі місця під мікроскопом виглядають темними, у той час як основна маса зерен виглядає світлішою.

Зразки сплавів для мікроскопічного аналізу (мікрошліфи) піддавали хімічній обробці у реактиві, склад якого включає 92 мл соляної кислоти (HCl), 5 мл сірчаної кислоти (H_2SO_4), 3 мл азотної кислоти (HNO_3), 5 г сульфату міді (CuSO_4) та 50 мл етанолу ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), або здійснювали електролітичне травлення у розчині, який містить 9,8 г сірчаної кислоти (H_2SO_4), 16 г хлориду натрію (NaCl), 5,4 г сульфату заліза (FeSO_4) та 100 мл води (H_2O), застосовуючи густину струму $0,1 \text{ A/cm}^2$.

Для детального вивчення мікроструктури зразки швидкорізальної сталі у відлитому стані, а також після здійснення комплексу термічного оброблення, було піддано процесу травлення. Час взаємодії із реактивом склав 8 до 10 секунд для відлитих зразків та збільшувався до 150-170 секунд для зразків, що пройшли гартування. Після травлення, зразки було ретельно промито у воді та висушено за допомогою фільтрувального паперу. Металографічний аналіз був здійснений із застосуванням мікроскопа «NEOPHOT 21» та РЕМ, налаштованих на збільшення в 400, 1250 та 1600 разів.

2.3 Принцип дії РЕМ

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) є незамінним інструментом у вивченні мікроструктур металевих сплавів. Завдяки йому, ми можемо візуалізувати поверхню зразка з чудовою гостротою зображення та глибиною фокусу, а також провести детальний хімічний аналіз досліджуваного сегмента за допомогою вбудованого рентгенівського мікроаналізатора.

За принципом дії мікроскопа, електрони, що випромінюються нагрітим до 2430°C вольфрамовим катодом, прискорюються в електричному полі, створеному потенціалом до 50 кВ між катодом і анодом. Електронний пучок проходить через серію конденсорних лінз, які фокусують його в тонкий зонд розміром від 0,1 до 3 мікрометрів. Регулювання інтенсивності та точність фокусування зонда на поверхні зразка досягається зміною струму в лінзах, що взаємодіють з магнітним полем.

Фокусований пучок електронів може бути статичним або рухатися по растровому малюнку за допомогою скануючого генератора та системи відхилень. Образ, синхронізований із скануванням зонда, відтворюється на екрані електроннопроменевої трубки. Взаємодія первинних електронів із зразком призводить до таких явищ: пружне розсіяння, що відображає електрони з невеликою зміною в енергії, абсорбцію електронів, генерацію вторинних електронів та утворення специфічного рентгенівського випромінювання. Вторинні електрони, які є слабо зв'язаними, випромінюються з зовнішніх електронних оболонок атомів після непружної взаємодії з первинними електронами. Характеристичне рентгенівське випромінювання, що виникає при взаємодії первинних електронів з внутрішніми оболонками атомів, несе інформацію про хімічний склад елементів зразка, оскільки енергія цих квантів, а конкретніше, довжина хвилі, є унікальною для кожного хімічного елемента. Використання РЕМ є ключовим для аналізу мікроструктур металічних сплавів, забезпечуючи високу роздільну

здатність та визначення глибини поля зображення. Інтегрований рентгенівський мікроаналізатор дозволяє проводити глибокий хімічний аналіз вибраної ділянки.

В процесі сканування поверхні зразка електронним зондом растрового електронного мікроскопу (РЕМ), локальні особливості матеріалу такі як фазові включення та варіації рельєфу спричиняють зміни в інтенсивності розсіяних електронів. Ці зміни, в свою чергу, впливають на яскравість відповідних точок на екрані пристрою, формуючи контрастне зображення поверхні зразка.

У РЕМ розрізняють два основних типи контрасту: контраст, зумовлений різницею в хімічному складі, який корелює з атомними номерами елементів матеріалу, та топографічний контраст, обумовлений властивостями рельєфу зразка. Райони з вищим атомним номером вирізняються більшою яскравістю через пряму пропорційність між атомним номером та кількістю розсіяних електронів. Топографічний контраст виникає внаслідок взаємодії рельєфних ділянок з електронним променем під різними нахилами, що змінює кількість реєстрованих електронів залежно від кута падіння.

Об'ємний вигляд структури, що спостерігається у РЕМ, є результатом високої глибини різкості зображення. Цей тип контрасту є ключовим при аналізі механізмів руйнування матеріалів. Водночас, при фіксації струму поглинання, зображення набуває контрасту, який є протилежним до того, що спостерігається при відбитих та вторинних електронах.

Масштабування зображень у РЕМ забезпечується шляхом порівняння розмірів скануючого растра на екрані з розмірами растра на поверхні зразка. Розмір растра на об'єкті можливо змінювати, регулюючи силу струму в котушках сканування. Діапазон масштабування в РЕМ варіюється від 50 до 200 тисяч кратно, що значно перевищує можливості звичайного оптичного мікроскопа.

2.4 Визначення механічних властивостей

Для оцінки твердості сплавів застосовували метод Роквелла, використовуючи прилад ТК-2. У ситуаціях, коли фіксоване значення твердості не перевищувало 100 HRB, проводили вимірювання з використанням сталевий кульки як індентора, та шкали В (HRB). Однак, коли твердість сплаву була вищою за цю позначку, вимірювання продовжували за шкалою С (HRC), використовуючи алмазний конус як індентор. Щоб уніфікувати показники твердості в одну шкалу, використовували стандартну таблицю переведення, де HRB 100 еквівалентно HRC 20.

Ударну в'язкість зразків аналізували без створення додаткових надрізів, використовуючи зразки Менаже з квадратним перерізом 10x10 мм та довжиною 55 мм. Для випробувань застосовували маятниковий копер Шарпі.

Міцність на згин визначалася за допомогою випробувань на універсальному випробувальному апараті МК-30А. Зразки розмірами 10x10x55 мм без надрізів піддавали навантаженню до 1200 кПа.

Границю текучості вимірювали на апараті ПД-40.

Кількість залишкового аустеніту оцінювали у зразках розміром 6x6x50 мм, використовуючи магнітометричний комплекс БУ-2. Для порівняння використовували зразок з аналогічного сорту сталі, який був підданий відпалу.

Термообробка зразків включала гартування з різних температурних режимів та триразовий відпуск при температурі 560 °С, тривалістю одна година для кожного етапу.

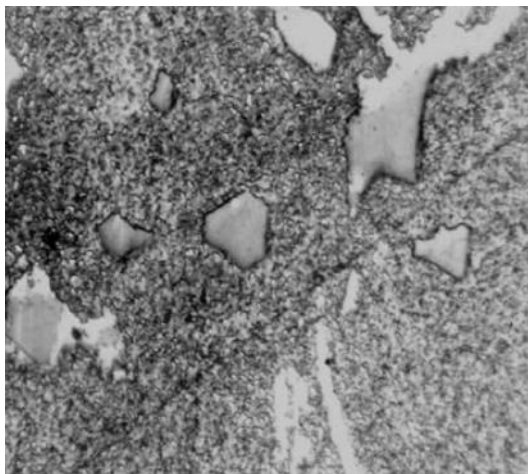
Металеві вироби піддавали термообробці застосовуючи стандартне пічне устаткування та контрольно-вимірювальну апаратуру. Процеси відпалу здійснювали в камерних печах, а гартування та відпуск відбувалися відповідно в електролітних і тигельних ваннах. Гартування матеріалу проводили в ванні з хлоридом барію, тоді як відпуск здійснювали у ванні з селітри.

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

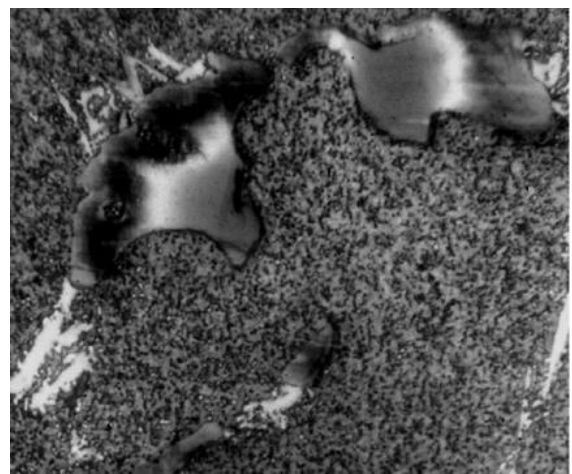
3.1 Структура литого металу

Досліджувані зразки литого металу були виготовлені із центральної осьової зони поперекових шаблонів, які були вирізані зі середньої за висотою частини злитків вагою 20 кг.

Структура литої сталі дослідних плавів складалася з мартенситу, аустеніту та карбідів (рис. 3.1).



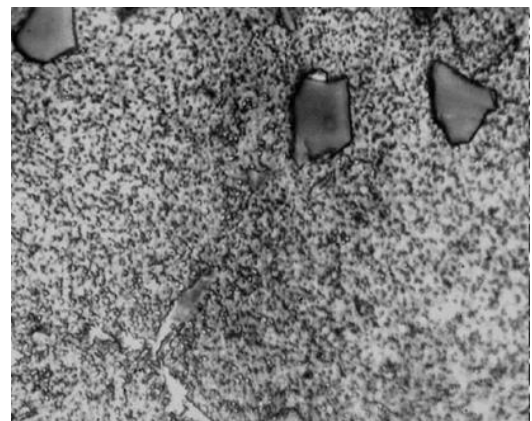
а



б



в



г

а – карбід $(\text{TiNb})\text{C}$; б – карбід $(\text{VNb})\text{C}$; в – карбід TiC ; г – карбід NbC

Рисунок 3.1 – мікроструктура сталі РЗМЗФ2БІТ, $\times 1250$ (а, б, в), $\times 1600$ (г)

Дендритні зони сталі марки РЗМЗФ2БІТ характеризувались наявністю високотемпературних карбідів:

- карбіди ніобію з правильною геометричною формою, збагачені ванадієм та незначною присутністю титану, які під час теплового травлення набувають коричневого відтінку (рис. 3.1, а);

- карбіди ванадію, з додаванням інших легувальних елементів, виключаючи титан, що забарвлюються в синій колір після теплового травлення (рис. 3.1, б);

- титанові карбіди різних розмірів, зокрема окремі великі карбіди, що утворюють грона, і які стають коричневими після теплового травлення (рис. 3.1, в);

- складні карбіди правильної форми, що містять титан, ніобій та ванадій, які після теплового травлення приймають коричневе забарвлення (рис. 3.1, г);

В проміжках між дендритами для обох типів сталі була присутня пластинчаста евтектика, утворена карбідами M_2C , невеликою кількістю карбідів ванадію, які мають жовтий колір при тепловому травленні, та γ -кристалами.

Мікроструктура литої сталі після відпалу містила сорбітоподібний перліт, а також первинні та вторинні карбіди.

3.2 Дослідження природи карбідів

Для вивчення виготовляли зразки так само, як описано у розділі 2.1. Кожний тип швидкорізальної сталі представляли три зразки: після відпалу, після гартування та після гартування з наступним відпуском. Зразки розміщували у дві касети (по три зразки в кожній), одночасно шліфували та полірували, після чого піддавали тепловому травленню для виявлення карбідів за кольором.

Мікрорентгеноспектральний аналіз найбільших карбідів усіх характерних груп проводили на мікрозонді "М-46", визначаючи інтенсивність характеристичного рентгенівського випромінювання K_{α} – ліній титану, ванадію, хрому, заліза і L_{α} – ліній ніобію, молібдену та вольфраму, попередньо вибираючи карбіди за зображенням у потоці поглинених електронів. Як еталони використовували чисті елементи.

Основні типи карбідів у відпаленому стані – це M_2C та MC . Гартування та відпуск не вносять змін до їх складу, але спричиняють розпад карбіду M_2C на карбіди M_6C та MC . Зміну легованості твердого розчину після окремих етапів термообробки не вдалося встановити через наявність дрібних виділень вторинних карбідів під час відпалу та відпуску.

Фази, що забарвились у коричневі тони під час теплового травлення, є карбідами типу MC на основі титану та ніобію. Унаслідок взаєморозчинності TiC і NbC , ці фази мають змінний склад, який коливається від TiC , $(Ti, Nb)C$ до NbC , і включають ванадій. Фази, що набули синіх та жовтих відтінків, є карбідами типу MC на основі ванадію, які також містять ніобій. Фази білого кольору – це карбіди типу M_2C . Варто зазначити, що титан та ніобій практично не входять до складу матриці.

3.3 Властивості деформованої сталі в відпаленому стані

Мікроструктура дослідних швидкорізальних сталей після відпалу складається із сорбітоподібного перліту та вільних карбідів. Розмір цих карбідів був визначений за допомогою автоматичного макроаналізатора. Як свідчать результати аналізу, середній розмір карбідів у досліджуваних швидкорізальних сталях менший, ніж у сталі Р6М5 (табл. 3.2, табл. 3.3, рис. 3.2).

Таблиця 3.2 – Об’ємна доля та розмір карбідів

Марка сталі	Об’ємна доля карбідів, %	Середній розмір карбідів, мкм
РЗМЗФ2БІТ	0,227	1,31
Р6М5	0,374	1,58

Таблиця 3.3 – Розподіл карбідів у структурі дослідних сталей за розмірами

Марка сталі	Розподіл карбідів за розмірами, %								
	1,0-1,4	1,4-2,0	2,0-2,8	2,8-4,0	4,0-5,6	5,6-8,0	8,0-11,2	11,2-16,0	16,0-22,4
РЗМЗФ2БІТ	40,9	20,8	16,6	9,5	4,6	3,3	2,9	1,1	0,2
Р6М5	33,6	26,8	17,	8,9	7,0	4,5	1,0	0,5	-

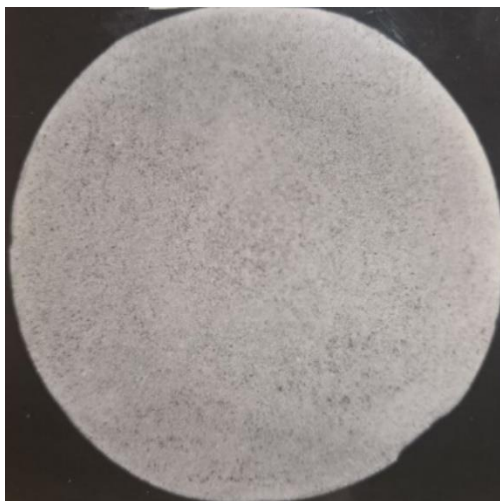


Рисунок 3.2 – Мікроструктура сталі РЗМЗФ2БІТ, х400

У зразках сталі, що випробувались, частка карбідів була нижчою порівняно зі сталлю Р6М5 через їх меншу легованість. Експериментальні сталі мають задовільну твердість та рівномірність розподілу карбідів (табл. 3.4, рис. 3.3).

Таблиця 3.4 – Твердість та карбідна неоднорідність дослідних сталей

Марка сталі	Діаметр відбитка, $\text{м} \times 10^{-3}$	Твердість, НВ	Карбідна неоднорідність, бал
РЗМЗФ2БІТ	3,95	235	3
Р6М5	-	-	3

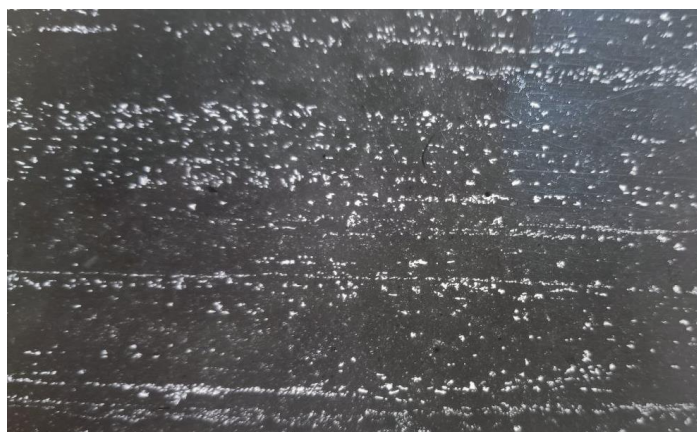


Рисунок 3.3 – Карбідна неоднорідність дослідного металу

Глибина знеуглецьованого шару металу з дослідних плавов була нижчою, ніж у сталі Р6М5 (табл. 3.5), що зумовлено меншим вмістом молібдену в перших.

Таблиця 3.5 – Результати визначення глибина знеуглецьованого шару

Марка сталі	Форма та розмір прутка, $\text{м} \times 10^{-3}$	Глибина знеуглецьованого шару ($\text{м} \times 10^{-3}$)
РЗМЗФ2БІТ	кр. 45	0,57-0,7 (0,96)
Р6М5	кр. 45	0,66-0,88 (0,95)
Примітка: в дужках – норма глибини знеуглецьованого шару за [15]		

3.4 Характеристики сталі після гартування

Для визначення оптимальної температури для процесу гартування було здійснено експериментальний аналіз, який включав температурні випробування в межах таких показників ($^{\circ}\text{C}$): 1180, 1200, 1210, та 1230. Дослідження розмірів аустенітного зерна у сталевих прутах з перерізом 30 мм після процедури гартування показано у табл. 3.6.

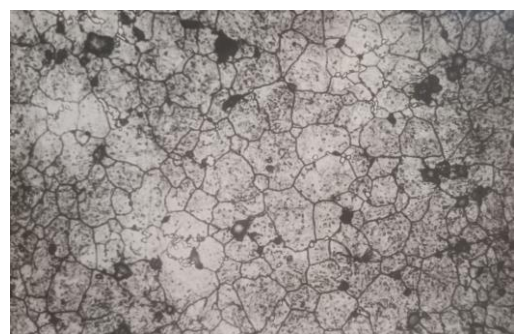
Таблиця 3.6 – Величина зерна аустеніту залежно від температури гартування

Марка сталі	Розмір зерна аустеніту після гартування від різних температур, номер			
	1180 $^{\circ}\text{C}$	1200 $^{\circ}\text{C}$	1210 $^{\circ}\text{C}$	1230 $^{\circ}\text{C}$
РЗМЗФ2БІТ	10	10	10	9,10
Р6М5	10	10	10	10

З цих відомостей очевидно, що під час гартування при температурі 1230 $^{\circ}\text{C}$ в швидкорізальних сталях спостерігається ріст зерна (рис. 3.4).



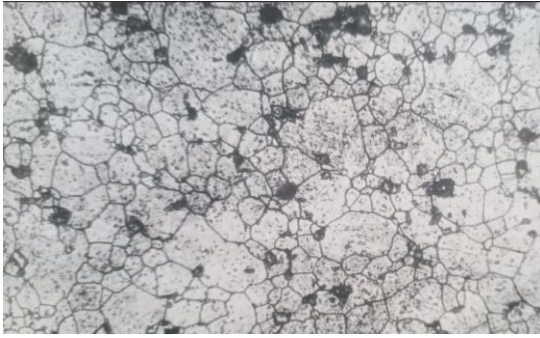
а



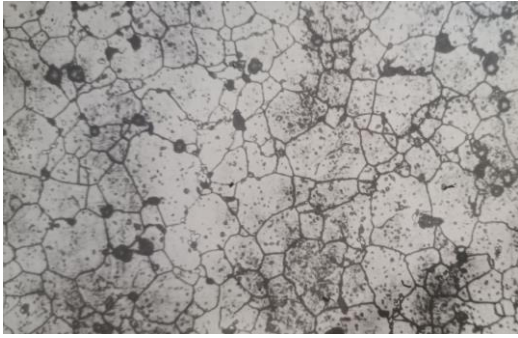
б

а – 1180 $^{\circ}\text{C}$; б – 1200 $^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.4 – Мікроструктура сталі РЗМЗФ2БІТ після гартування з різних температур, $\times 400$



В



Г

В – 1210 °С; Г – 1230 °С

Рисунок 3.4 – аркуш 2

Дослідні сталі відрізняються високим рівнем аустеніту в загартованому стані, що призводить до нижчої твердості порівняно зі сталлю Р6М5 (табл. 3.7, 3.8). Максимальне накопичення аустеніту в експериментальних сталях відбувається при температурі гартування в діапазоні 1200-1210 °С, і з подальшим підвищенням температури його кількість не збільшується.

Таблиця 3.7 – Об’ємна доля аустеніту в залежності від температури гартування

Марка сталі	Об’ємна доля аустеніту після гартування від різних температур, %			
	1180 °С	1200 °С	1210 °С	1230 °С
РЗМЗФ2БІТ	43	46	46	45
Р6М5	15	16	20	26

Таблиця 3.8 – Залежність твердості від температури гартування

Марка сталі	Твердість після гартування від різних температур, %			
	1180 °С	1200 °С	1210 °С	1230 °С
РЗМЗФ2БІТ	62,5	60,5	60,5	60,0
Р6М5	63,5	63,0	63,0	62,5

3.5 Властивості сталі після відпуску

Не дивлячись на високий вміст аустеніту, що спостерігається у дослідних швидкорізальних сталях після процесу гартування, триразовий відпуск (тривалість кожного – 1 година) при температурі 560 °С, забезпечує майже повний його розпад (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Об’ємна доля залишкового аустеніту після триразового відпуску при 560 °С, %

Марка сталі	Об’ємна доля аустеніту після гартування від різних температур, %			
	1180 °С	1200 °С	1210 °С	1230 °С
РЗМЗФ2БІТ	5,0	6,5	5,5	4,5
Р6М5	0	0	0	0

Отже, для дослідних швидкорізальних сталей бажаним є триразовий відпуск, аби досягти максимального розпаду аустеніту та забезпечити найбільшу вторинну твердість (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Вплив кількості відпусків (при 560 °С) на вторинну твердість

Марка сталі	Твердість після гартування та відпуску, HRC											
	1180 °C			1200 °C			1210 °C			1230 °C		
	Кількість відпусків											
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
РЗМЗФ 2БІТ	65,0	65,5	66,5	65,5	66,5	67,0	65,0	66,5	67,0	65,0	65,5	67,0
Р6М5	65,5	65,5	65,0	66,5	66,0	66,0	66,0	66,0	65,5	67,0	67,0	66,5

Відповідно до даних табл. 3.10, після гартування від 1180 до 1210 °С вторинна твердість дослідних сталей на 1,0-1,5 HRC вища, ніж у сталі Р6М5, і приблизно на тому ж рівні, що і твердість сталі Р6М5Ф3 (66,0-66,5 HRC). Зі зростанням температури гартування до 1230 °С перевага в твердості дослідних сталей зменшується.

Червоностійкість оцінювали після додаткового нагріву до 620 та 630 °С протягом чотирьох годин на зразках, що були піддані гартуванню (з різних температур) та триразовому відпуску при 560 °С згідно табл. 3.11. Червоностійкість дослідних сталей у всьому діапазоні температур гартувань була на рівні червоностійкості сталі Р6М5Ф3, як при температурі додаткового відпуску 620 °С, так і при 630 °С, і на 1-2 HRC вище, ніж у сталі Р6М5. Крім того, підвищення температури гартування вище 1200 °С не призводило до збільшення червоностійкості.

Таблиця 3.11 – Червоностійкість сталей, що досліджувались

Марка сталі	Твердість після гартування та відпуску, HRC							
	1180 °C		1200 °C		1210 °C		1230 °C	
	Температура відпусків							
	620 °C	630 °C	620 °C	630 °C	620 °C	630 °C	620 °C	630 °C
Р3М3 Ф2БІТ	60,5	59,5	61,0	60,0	61,0	60,0	61,0	59,5
Р6М5	58,0	56,5	59,0	57,5	58,5	57,5	59,0	58,5

Інші механічні властивості, такі як міцність при згині (табл. 3.12), ударна в'язкість (табл. 3.13) та границя текучості при стисненні (табл. 3.14), визначалися на зразках, що пройшли повне термічне оброблення.

Таблиця 3.12 – Вплив температури гартування на міцність при згині

Марка сталі	Міцність на згин після гартування від різних температур, МПа			
	1180 °C	1200 °C	1210 °C	1230 °C
РЗМЗФ2БІТ	3449	3246	2726	2396
Р6М5	3941	3639	3944	3412

Таблиця 3.13 – Вплив температури гартування на ударну в'язкість

Марка сталі	Ударна в'язкість, МДж/м ²			
	1180 °C	1200 °C	1210 °C	1230 °C
РЗМЗФ2БІТ	0,30	0,27	0,21	0,14
Р6М5	0,35	0,31	0,27	0,21

Таблиця 3.14 – Залежність границі текучості при стисненні ($\sigma_{0,2}$) від температури

Марка сталі	Границя текучості при стисненні, МПа			
	20 °C	560 °C	600 °C	620 °C
РЗМЗФ2БІТ	3300	2417	2336	1824
Р6М5	3342	2505	2087	1950

Зібрані дані свідчать про те, що сталь, що випробувалась, за показниками міцності та ударної в'язкості поступається стандартній сталі Р6М5. Це пояснюється тим, що титан у складі сталі сприяє утворенню плівки під час лиття. Оскільки метал було вилито у відливки з невеликою масою та перерізом, існує можливість того, що ці плівки могли потрапити до центральних частин відливок. Зі зростанням маси та перетину відливка, негативний вплив цього явища має зменшуватися.

Границя текучості при стисненні, що визначає стійкість робочих поверхонь інструментів проти деформації, була визначена на зразках з

діаметром 12 мм та висотою 15 мм в діапазоні температур від 20 до 620 °С (табл. 3.14).

Аналізуючи наведені відомості, можна зробити висновок, що границя текучості експериментальної сталі та стандартної сталі Р6М5 знаходиться майже на ідентичному рівні.

Отже, характеристики металу великомасштабних лабораторних виплавок сталі марки РЗМЗФ2БІТ, легованої ніобієм і титаном, за ключовими параметрами (вторинна твердість, червоностійкість, стійкість ріжучого інструменту) перевершують сталь марки Р6М5, хоча в деяких аспектах механічних властивостей (ударна в'язкість, міцність при згині) дослідна сталь їй дещо поступається.

3.6 Висновки до розділу 3

1. У лабораторних умовах було успішно виготовлено партії сталі марок РЗМЗФ2БІТ та Р6М5 методом оплавлення у відкритих індукційних печах. Застосування шихти з відходів сталі ШХ15 і феросплавів дозволило отримати злитки з відповідним хімічним складом, де основні елементи мали наступні концентрації: для РЗМЗФ2БІТ 20 кг - С (1,18%), W (3,05%), Мо (2,82%), для Р6М5 20 кг - С (0,83%), W (6,10%), Мо (5,20%).

2. Структура литої сталі складалася з мартенситу, аустеніту та карбонітридів. Дендритні зони сталі марки РЗМЗФ2БІТ характеризуються наявністю карбідів (TiNb)C, (VNb)C, TiC, та NbC, що під час теплового травлення набувають коричневого, синього та жовтого відтінків.

3. Встановлено, що основними типами карбідів у відпаленому стані є M_2C та MC. Гартування та відпуск не змінюють їх складу, але спричиняють розпад карбіду M_2C на карбіди M_6C та MC.

4. Після відпалу структура сталі РЗМЗФ2БІТ містить сорбітоподібний перліт та вільні карбіди, з середнім розміром карбідів 1,31 мкм та об'ємною долею 0,227%. Твердість сталі після відпуску становить 235 НВ з карбідною неоднорідністю у 3 бали.

5. Оптимальною температурою для процесу гартування було встановлено 1180-1210 °С для сталі РЗМЗФ2БІТ, з огляду на зерно аустеніту та максимальну вторинну твердість до 67,0 HRC. Підвищення температури гартування до 1230°С призводить до зростання зерна.

6. Триразовий відпуск при 560 °С забезпечує майже повний розпад залишкового аустеніту та досягнення вторинної твердості до 67,0 HRC для сталі РЗМЗФ2БІТ. Червоностійкість сталі РЗМЗФ2БІТ після відпуску при температурі 620 °С і 630 °С становить 61,0 HRC, що на 1-2 HRC вище ніж у сталі Р6М5.

7. Характеристики сталі РЗМЗФ2БІТ, легованої ніобієм і титаном, за ключовими параметрами (вторинна твердість, червоностійкість, стійкість ріжучого інструменту) перевершують сталь марки Р6М5, проте в деяких аспектах механічних властивостей (ударна в'язкість, міцність при згині) дещо поступається.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даному розділі представлено систематичний огляд потенційних загроз та викладено ключові стратегії з метою забезпечення безпеки працівників під час вивчення властивостей зразків швидкорізальних сталей, включаючи такі марки як РЗМЗФ2БІТ та Р6М5.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Потенційні небезпеки при виконанні дослідної роботи включають:

1. Небезпеки, пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» [18], а саме:

- недоліки у створенні та підтримці безпечних умов на робочих місцях, пов'язані з відсутністю проведення організаційних заходів, таких як навчання та перевірка знань по охороні праці, брифінгів, а також неінформуванням працівників про потенційні ризики;

- невідповідне нормам безпеки обладнання робочих зон, що може бути пов'язано з несправністю обладнання, відсутністю захисту, неналежними умовами евакуації, блокуванням шляхів евакуації;

- непридатність виробничих приміщень, що може призвести до зниження конструктивної міцності будівель, перевищення допустимих рівнів концентрації шкідливих речовин у повітрі, а також до недостатнього освітлення приміщень.

2. Ризики, які впливають із недотримання вимог ергономіки при організації робочих просторів для наукових співробітників у приміщеннях дослідницьких лабораторій, зокрема неузгодженість розмірів робочих зон та

перевищення дозволеної кількості осіб, які можуть одночасно перебувати в цих просторах, що регламентовано в ДБН В.2.2-28:2010. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення [19] та СНиП 2.09.02 – 85 «Виробничі будівлі» [20], а також неоптимальне розміщення наукового обладнання та офісної техніки.

3. Недоліки у професійній підготовці спеціалістів, які можуть виникати через брак фахових знань, відсутність розуміння технологічних процесів та незнайомість з експлуатаційною документацією, здатні призводити до непередбачених надзвичайних подій.

4. Ризики, що виникають при визначенні хімічного складу об'єктів дослідження за допомогою спектрального аналізу, реалізованого через застосування спектрофотометрів, або при проведенні рентгенофлуоресцентного аналізу з використанням рентген-флюоресцентних мікроаналізаторів, а також дериватографічного аналізу з використанням дериватографів, пов'язані з наступними аспектами: інтенсивне електронне та оптичне випромінювання під час спектрального аналізу, іонізуюче випромінювання в контексті рентгенофлуоресцентного аналізу.

5. Ризики, що виникають під час підготовки зразків або об'єктів дослідження до термічної обробки, що може супроводжуватися механічними травмами через порушення норм охорони праці при використанні абразивного інструменту, згідно з НПАОП 28.0-1.30-12 [21]. Це включає в себе ризики, пов'язані з використанням абразивного інструменту, який не пройшов належних випробувань, та порушенням правил експлуатації, що може призвести до серйозних травм.

6. Ризики, пов'язані з використанням засобів оптичної металографії, що включають потенційне пошкодження зорової системи через неправильне використання світлофільтрів, об'єктивів, та окулярів при роботі з оптичними мікроскопами. Ризик механічних пошкоджень під час підготовки проб для визначення твердості та інших механічних характеристик, особливо, коли не дотримуються норми охорони праці. Потенційні небезпеки включають

використання застарілого обладнання та недотримання процедур безпеки під час тестувань.

7. Загрози, асоційовані з тривалим використанням комп'ютерів, що включають ураження кістково-м'язової системи через одноманітну роботу в статичній позі, що може спричинити зниження працездатності та виникнення професійних захворювань.

8. Порушення норм пожежної безпеки, як визначено в НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [22], може призвести до загоряння. Неправильне визначення типів та кількості первинних засобів пожежогасіння стосовно категорій приміщень може стати причиною пожеж.

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

4.2.1 Захист працівників у робочій зоні

Відповідно до положень Нормативно-правового акту з охорони праці 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників» [18], наступні засади мають бути дотримані:

- обов'язковість проходження всіма співробітниками відповідного навчання та атестації з охорони праці, згідно з регламентацією, викладеною в «Типові положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці», що було затверджено наказом Державної служби з питань нагляду за охороною праці (Держпраці) від 26 січня 2005 року №15;

- зобов'язання роботодавця інформувати працівників про всі аспекти охорони праці, які стосуються підприємства у цілому, так і конкретних особливостей виконуваних робіт на їхніх робочих місцях, у тому числі інформацію про потенційні небезпеки та заходи для запобігання ним. З цією метою рекомендується проведення різних видів інструктажів: вступний,

первинний (при прийнятті на роботу), повторний (періодичний), позаплановий (у разі змін у робочих умовах) та цільовий (для певних видів робіт);

- вимоги до облаштування робочих місць включають забезпечення надійного стану обладнання і захисних пристроїв, вжиття заходів для безпечної ліквідації будь-яких несправностей, котрі можуть створити ризик для безпеки або здоров'я співробітників. Також передбачається влаштування систематичного контролю та перевірок на ефективність роботи захисних засобів і пристроїв, призначених для попередження або нейтралізації небезпек.

Ергономічний дизайн місця, де проводиться наукова робота, має відповідати передовим стандартам комфорту та функціональності, забезпечуючи таке розташування обладнання та документації на робочій поверхні, що максимізує ефективність дослідницького процесу.

Робоча поверхня столу ВДТ повинна дозволяти регулювання висоти в діапазоні від 680 до 800 мм, тоді як габарити ширини та глибини мають бути вибрані таким чином, аби забезпечити комфортне виконання завдань у межах доступної моторної зони (оптимальні параметри: ширина - 600...1400 мм, глибина - 800...1000 мм).

Стіл має бути конструйований з урахуванням достатнього простору для ніг, який по висоті не повинен бути меншим ніж 600 мм, по ширині - не менше 500 мм, а по глибині - не менше 450 мм на рівні колін і не менше 650 мм на рівні простягнутих ніг.

Робоче крісло має бути обладнане механізмом для підйому та повороту, забезпечувати регулювання висоти, кута нахилу сидіння та спинки, а також відстань між спинкою та переднім краєм сидіння. Поверхня сидіння повинна бути рівною з округленим переднім краєм. Регулювання по кожному параметру повинно відбуватися незалежно одне від одного, легко та надійно фіксуватися. Крок регулювання компонентів крісла повинен бути 15...20 мм для лінійних розмірів та 2...5 градусів для кутових, при цьому зусилля, необхідне для регулювання, не має перевищувати 20 Н.

Поверхня сидіння робочого крісла має забезпечувати регульовану висоту від 400 до 500 мм, при цьому її ширина і глибина не повинні бути меншими ніж 400 мм. Кут нахилу сидіння може бути змінений до 15 градусів уперед та до 5 градусів назад.

Спинка стільця повинна мати висоту 300 ± 20 мм і ширину не менше 380 мм, з радіусом кривизни горизонтальної площини 400 мм. Кут нахилу спинки має бути регульований в діапазоні від 1 до 30 градусів від вертикального положення. Відстань від спинки до переднього краю сидіння має мати можливість регулювання від 260 до 400 мм.

Для зменшення статичного навантаження на м'язи верхніх кінцівок рекомендується використання підлокітників довжиною не менше 250 мм та шириною від 50 до 70 мм, висоту яких можна коригувати над сидінням в проміжку 230...260 мм, а також відстань між підлокітниками в межах 350...500 мм.

Матеріал сидіння та спинки стільця повинен бути напівм'яким, з антиковзним і повітронепроникним покриттям, яке легко очищається та не схильне до електризації.

Робоче місце має бути укомплектоване підставкою для ніг, шириною не менше ніж 300 мм і глибиною не менше ніж 400 мм, висота та кут нахилу якої регулюються до 150 мм і до 20 градусів відповідно. Підставка повинна володіти рифленою поверхнею та маленьким бортиком на передньому краю висотою 10 мм.

Для профілактики розвитку кістково-м'язових розладів, спричинених тривалим статичним навантаженням, необхідно переривати роботу для виконання фізичних вправ 2-3 рази протягом дня, тривалістю від 5 до 10 хвилин. Як основне обладнання для сидіння пропонується використання стільця з регульованою висотою, оснащеного підлокітниками та спинкою.

4.2.2 Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження

Ключовими результатами у сфері металургії є встановлення характеру структури металів, аналіз фазового складу, вимірювання параметрів механічних, виробничих та експлуатаційних характеристик вивчених матеріалів, а також аналітична оцінка можливостей застосування дослідних результатів для подальшого внесення інновацій.

Для забезпечення безпеки під час дослідницької роботи рекомендовані наступні заходи:

1. Для запобігання механічних ушкоджень під час підготовки зразків важливо користуватися обладнанням, що перебуває у належному стані, своєчасно замінювати зношені деталі та використовувати захисне обладнання, зокрема захисні окуляри та рукавички. Щоб уникнути травмування очей, слід застосовувати захисні окуляри з бічними щитками, які захищають від летючих часток з різних напрямків. Також рекомендовано використання прозорих екранів для надійного захисту очей працівників від часток, що можуть відлітати під час роботи.

2. При роботі зі шліфувальними та заточувальними машинами:

- монтаж абразивних дисків на обладнанні має виконуватися виключно кваліфікованими технічними фахівцями, які пройшли необхідне навчання;

- утримуватися від використання абразивних кіл, що містять дефекти, оскільки це може призвести до аварійних ситуацій. Кожне абразивне коло має бути оснащене ідентифікаційним знаком або міткою, що свідчить про його випробування, включаючи унікальний номер та підпис відповідальної за це особи;

- обов'язково має бути розміщено інформаційну табличку біля кожного верстата, яка вказує максимальну дозволenu швидкість обертання абразивного кола та частоту обертання шпинделя верстата, виміряну в оборотах за хвилину;

- щоб запобігти травмам під час роботи з абразивними колами, необхідно використовувати захисні кожухи для покриття виступаючих кінців шпинделя та кріпильних елементів;

- робоча площадка для підручників має бути достатньої величини, щоб забезпечити стабільне розміщення оброблюваної деталі. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального кола не має перевищувати 3 міліметри;

- забороняється проведення робіт без використання підручника, захисного екрана чи окулярів, а також у випадках, коли верстат не заземлений або не обладнаний системою відсмоктування абразивного пилу, відповідно до державного стандарту ДЕСТ 12.3.028-82 [23], що регулює процес обробки з використанням абразивних та ельборових інструментів.

3. Щоб мінімізувати ризик механічних пошкоджень під час створення зразків, важливо:

- оперувати лише на обладнанні, що перебуває у належному робочому стані, забезпечуючи своєчасну заміну компонентів зі сплинулим терміном служби;

- використання захисних окулярів та рукавичок є обов'язковим, щоб забезпечити належний захист рук та очей;

- для попередження травм органів зору, рекомендовано застосування захисних окулярів з фігурними бічними елементами, які можуть відкидатись, тим самим захищаючи очі від потрапляння частинок твердих тіл з переду, знизу та боків;

- рекомендується використання прозорого захисного екрану, який гарантує захист очей працівника від частинок, що можуть відлітати під час роботи.

4.2.3 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці

Забезпечення належних параметрів мікроклімату у виробничих просторах здійснюється завдяки комплексним системам централізованого опалення та вентиляції, які працюють згідно нормам та стандартами, викладеними ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [24]. У періоди знижених температур застосовується централізоване опалення через установки, що розподіляють тепле повітря по робочих зонах.

У випадку потреби, забезпечується також колективний та індивідуальний захист працівників від негативного впливу шкідливих речовин, що можуть міститися у повітряному середовищі приміщення. Для нейтралізації впливу шкідливих газів, аерозолів та пилу, приміщення оснащені системами місцевої витяжної вентиляції, які відводять токсичні викиди прямо з місць їх утворення. Конструкції місцевих відсосів інтегровані з виробничим обладнанням таким чином, що використання машин без активної вентиляції неможливе.

Для забезпечення безпеки працівників передбачені наступні заходи:

- при роботі з токсичними та забруднювальними матеріалами використовуються спеціальні захисні костюми, мантиї та фартухи;
- щоб уникнути впливу лугів і кислот, запроваджене носіння гумового взуття та рукавиць;
- для захисту шкіри рук, обличчя та шиї використовуються спеціальні захисні пасти, які володіють антитоксичними, олійностійкими та водовідштовхувальними властивостями;
- для захисту очей від опіків та подразнень застосовуються окуляри з герметичними оправами, маски та шоломи зі спеціальними захисними склами;
- захист дихальних шляхів забезпечується за допомогою фільтруючих та ізолюючих засобів, таких як газові маски та респіратори.

4.2.4 Заходи з пожежної безпеки

Пожежна безпека при дослідженнях забезпечується системою адресно-порогового пожежного сповіщення, яка використовує пристрій "Сигнал-10". Вона дозволяє інтегрувати до десяти адресних сповіщувачів у єдиний шлейф. Кожен із сповіщувачів обладнано можливістю передачі даних про свій оперативний стан за запитом пристрою. "Сигнал-10" регулярно ініціює опитування підключених сповіщувачів, що гарантує моніторинг їхньої функціональності та виявлення потенційно несправних або сумнівних пристроїв.

Дані, які "Сигнал-10" кваліфікує від адресних сповіщувачів, включають статуси "Норма", "Потребує обслуговування через запиленість", "Несправність", "Пожежа", "Ручне спрацювання пожежного сповіщувача", "Тест" та "Відключення".

Кожен з адресних сповіщувачів вважається окремою адресною зоною пристрою. У випадку інтеграції з мережевим контролером, є можливість активувати або деактивувати кожную адресну зону окремо. Операції включення та виключення охорони для адресно-порогового шлейфу впливають на всі адресні зони, що входять до даного шлейфу, але не впливають на стан адресних зон, які не асоційовані з цим шлейфом.

Проектування систем пожежного водопостачання виконується відповідно до вимог державних будівельних норм, а саме: ДБН В.2.5-64:2012 [25], що стосується внутрішнього водопроводу та каналізації, включаючи процеси проектування та будівництва; ДБН В.2.5-74:2013 [26], який регулює водопостачання зовнішніх мереж та споруд; а також ДБН В.2.5-75:2013 [27], який визначає вимоги до зовнішніх мереж каналізації та відповідних споруд.

Системи автоматичного пожежогасіння проектуються у згоді з ДБН В.2.5-56:2014 [28], що встановлює норми та стандарти для систем протипожежного захисту.

Щодо первинних засобів пожежогасіння, таких як вогнегасники різноманітних типів, їх використання та необхідну кількість визначають на підставі «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», затверджених Міністерством юстиції України 23 лютого 2018 року під № 225/31677. Дотримання цих правил вимагається з урахуванням площі приміщень та класів пожеж, для яких існує найвища ймовірність виникнення.

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Інтерес до швидкорізальних сталей в Україні постійно зростає, як у контексті промислового масового виробництва, так і для виготовлення унікальних предметів. Вартість цих матеріалів зумовлюється витратами на їх виробництво та на саму сировину. Прогнозування динаміки ринку тісно пов'язане із розвитком вітчизняної промисловості в цілому. Домінуючим чинником, що впливає на цінову політику в галузі, є вартість легувальних елементів, серед яких вирізняються молібден, вольфрам, кобальт, ванадій та нікель. Поточна політична та економічна ситуація в країні не сприяє зниженню цінового тиску.

Згідно з аналізом експертів Державної служби статистики, загальний обсяг ринку інструментальних сталей у межах країни досягає 4,8 тисяч тонн, що еквівалентно 56 мільйонам гривень на річному рівні. З цієї кількості, 4,4 тисячі тонн (або 44 мільйони гривень) припадає на інструментальні сталі, тоді як обсяг швидкорізальних сталей становить 0,4 тисячі тонн, або 12 мільйонів гривень на рік. Узагальнюючи ці дані, з урахуванням експортних показників, загальний обсяг ринку останніх кількох років оцінюється в діапазоні від 20 до 25 тисяч тонн.

Збільшення попиту на продукцію машинобудування як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках, а також прогрес української економіки, сприяють росту попиту на швидкорізальні сталі. Експансія зовнішніх ринків та економічний розвиток країни мають прямий вплив на збільшення споживання цих спеціалізованих матеріалів.

Головним джерелом інструментальних сталей на території України є підприємства ДСС. Імпортні вироби, які раніше надходили переважно з росії, зокрема від компаній "Іжсталь" та "Електросталь", нині мають мінімальну частку на українському ринку через геополітичні обставини і фактично

зведену до нуля присутність. Водночас, зростає проникнення на ринок продукції з Китаю. Хоча китайські сталі приваблюють низькими цінами, їхні характеристики часто не відповідають українським стандартам та вони не вирізняються тривалістю служби.

Останнім часом активізація індійських компаній спостерігається на українському ринку, які прагнуть знайти представників у регіоні Східної Європи. Проте відсутність локальних складських приміщень та тривалість поставок, що сягає не менше 45 днів, ставлять певні обмеження на їхню конкурентоспроможність. Продукція виробників з В'єтнаму та ОАЕ також починає з'являтися на українському ринку. Слід відзначити, що частка імпортової сировини для виробництва швидкорізальних сталей в Україні становить приблизно 65%.

Іноземні виробники поступово займають ніші, колись належні українським компаніям. Однак, за наявності сучасної науково-технічної інфраструктури та фінансової підтримки з боку інвесторів, можливості для українського виробництва розширюватися до міжнародного рівня є великими. В цьому контексті, актуальною стає задача створення таких сталей, які відповідають висунутим технічним вимогам і водночас є конкурентоспроможними та економно-легованими.

5.2 Послідовний аналіз собівартості виконання науково-дослідної роботи

Здійснено аналітичне дослідження орієнтирів застосування та основних переваг для користувачів, що стосуються останніх інноваційних розробок (табл. 5.1). Окреслено загальне розуміння концепції та ідентифіковано ключові потенційні ринкові сегменти, що вимагають визначення цільових груп споживачів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка нової економно-легованої швидкорізальної сталі із зниженим вмістом вольфраму та молібдену порівняно зі стандартною сталлю Р6М5	Інструментальне виробництво	Зниження вартості інструментів
	Металообробна промисловість	Підвищення ресурсу металообробного обладнання
	Авіаційна промисловість	Зменшення ваги авіаційних компонентів зі збереженням міцності за рахунок більш ефективної механічної обробки

Проведено аналіз характеристик потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	ПАТ «Мотор Січ», ПрАТ "Інструментальний завод", ТОВ "Металургія України", Sandvik Coromant, Kennametal
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабілізація з тенденцією до зростання завдяки інноваційним технологіям
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі витрати на НДДКР, необхідність сертифікації продукції
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність стандартам ISO, українським ДСТУ, сертифікація відповідно до вимог ЄС

Досліджено та визначено потенційні групи споживачів, охарактеризовано їхні основні потреби, а також розроблено перелік базових вимог до продукції, що відповідає критеріям кожної з груп (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)
Потреба в високоміцних матеріалах зі зниженими витратами на виробництво	Виробники інструментів, металообробні підприємства, авіабудівні компанії	Інструментальні заводи потребують міцності та довговічності; авіабудівельні компанії – легкості та міцності; металообробні підприємства – універсальності застосування	Висока якість за конкурентоспроможною ціною, сертифікати відповідності стандартам, технічна підтримка

Виконано SWOT-аналіз середовища реалізації інноваційного проекту (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – SWOT-аналіз проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Зниження виробничих витрат, екологічність за рахунок меншого використання рідкісних елементів, відкриття нових ринків за рахунок інноваційного продукту, зниження залежності від імпорту ресурсів, підвищення конкурентоспроможності продукції	Високі витрати на НДДКР, ризик неприйняття ринком нового продукту, залежність від постачальників нових видів сировини, можливі труднощі з ліцензуванням та сертифікацією
Можливості:	Загрози:
Розширення асортименту пропонованих матеріалів, зростання попиту на інноваційні матеріали, партнерство з великими виробниками інструментів та металообробного обладнання, можливість отримання державних субсидій для інноваційних проектів	Зміна законодавства в області екології та стандартизації, поява нових технологій з боку конкурентів, висока чутливість ринку до економічних коливань, інтелектуальні права конкурентів, що можуть обмежити вхід на ринок

Першим кроком розроблення ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.5).

Здійснивши аналіз проекту, була створена Схема зацікавлених осіб (карта стейкхолдерів), яка ефективно відображає мережу взаємовідносин між учасниками. Для наочного представлення цих взаємозв'язків, Схема включає три концентричні сфери інтересів, в яких розміщені усі сторони, причетні до інноваційного проекту, відповідно до рівня їх впливу, який виходить від ініціатора проекту. Внутрішній циркуль представляє сегмент, що перебуває під безпосереднім управлінням ініціатора проекту, що робить можливим

використання спрощених методів проектного менеджменту для внутрішніх стейкхолдерів (рис. 5.1).

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 інструментальної сталі, заводи з виготовлення виробів із швидкорізальної сталі	Висока, оскільки економічність виготовлення та екологічність продукту є актуальними питаннями	17 000	Помірна, присутність декількох лідерів ринку з сильними позиціями	Середня, вимагає значних початкових інвестицій та дотримання високих стандартів якості
Науково-дослідні інститути		3 000		

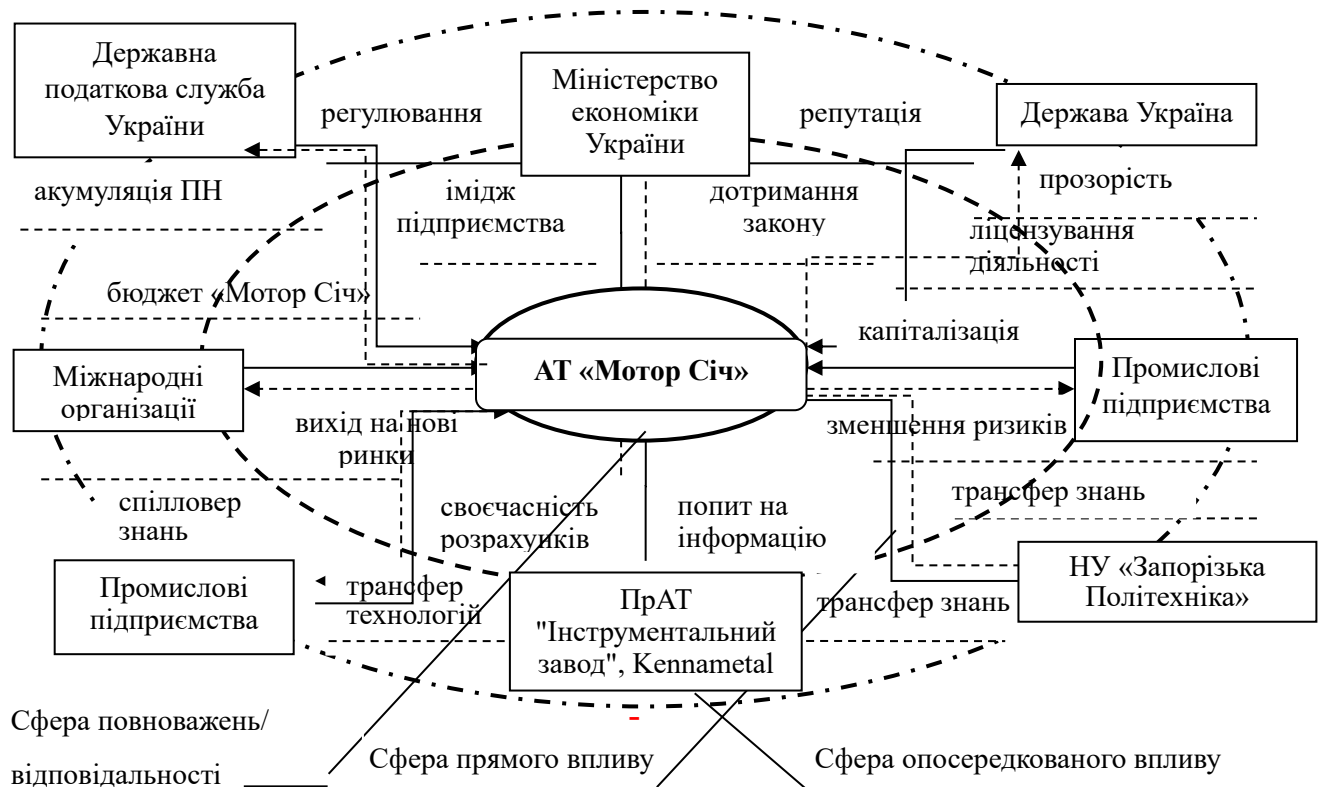


Рисунок 5.1 – Карта стейкхолдерів

В рамках відповідності заданим параметрам було здійснено обчислення вартості наукової роботи, орієнтованої на створення та інтеграцію інноваційних економно-легованих швидкорізальних сталей зі зниженим вмістом молібдену та вольфраму.

Обраховано затрати на оплату праці, враховуючи баланс робочого навантаження на кожного дослідника. Ці витрати охоплюють запланований фонд заробітної плати для всіх категорій персоналу, задіяного у наукових розробках (табл. 5.6).

Також було визначено вартість матеріалів, необхідних для здійснення науково-дослідної роботи. До цієї категорії входять витрати на закупівлю первинних матеріалів, які використовуються під час досліджень, а також для створення пробних об'єктів (табл. 5.7).

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	3	6700	20	1340	8040	289440	63676,8
Разом	7	39004	-	7800,8	46804,8	893332,8	196533,2

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Папір	—	2 блоки	120	240
Ручка	—	25 одиниць	15	375
Олівець	—	15 одиниць	10	150
Зразки	140	140 одиниць	145	20300
Реактиви	—	20 одиниць	900	18000
Змінні лінзи	—	2 одиниці	3200	6400
Тара зразків	—	14 одиниць	50	700
Разом				27110

Розраховано вартість спожитих послуг. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Виробнича програма, одиниць	Обсяг послуг	Тарифи	Сума, грн
Електропостачання	—	600 кВт×год	2,64 грн/кВт×год	1584
Водопостачання	—	7 м ³	28,3 грн/м ³	198,1
Теплопостачання	—	3 Гкал	3777 грн/Гкал	11331
Охоронна система	—	1	1500 грн	1500
Утилізація реактивів	3	3	200 грн	600
Разом				10185

Розраховано річну кількість амортизаційних відрахувань для обладнання, базуючись на початковій вартості основних фондів та встановленій нормі амортизації з умовою п'ятирічного періоду використання (табл. 5.9).

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	2	98287,0	196574,0	27520,4	3931,5
Світловий мікроскоп	1	125580,0	125580,0	17581,2	2511,6

Кінець таблиці 5.9

Аналізатор металів та сплавів	2	941240,0	1882480,0	263547,2	37649,6
Комп'ютер	3	26547,0	79641,0	11149,7	1592,8
Принтер	2	14521,0	29042,0	4065,9	580,8
Разом	10	1206175,0	2313317,0	323864,4	46266,3

Розроблено кошторис витрат (табл. 5.10) при проведення науково-дослідницької роботи на основі попередніх даних (табл. 5.6-5.9).

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати
Фонд заробітної плати, грн/рік	893333
ЄСВ, грн/рік	196533
Матеріальні витрати, грн/рік	46165
Вартість спожитих послуг, грн/рік	15213
Амортизація обладнання, грн/рік	323864
Поточний ремонт, грн/рік	46266
Виробнича собівартість, грн/рік	1521375
Адміністративні витрати, грн/рік	446666
Повна собівартість, грн/рік	1968041

5.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження результатів НДР

При використанні феросплавів (феровольфрам (30 % Fe), фероніобій (25 % Fe), феромолібден (30 % Fe), феротитан (35 % Fe)) та враховуючи вартість обробки (що становить 15% та до якої входять термічна обробка,

механічна обробка, лиття, тощо) розраховано собівартість сплавів, що розглядаються (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 економно-легованої сталі РЗМЗФ2БІТ становить: $C_2 = 230902,00$ грн/т.

Таблиця 5.11 – Вартість сировини для виготовлення сплавів

Назва матеріалу	Ціна грн/кг	Вміст, % Р6М5	Ціна за 1 кг, Р6М5	Вміст, % РЗМЗФ2БІТ	Ціна за 1 кг, РЗМЗФ2БІТ
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
Разом		100	256,64	100	200,78

Зниження собівартості (ΔC) розробленої економно-легованої сталі РЗМЗФ2БІТ, в порівнянні з вартістю промислової серійної сталі Р6М5 становить:

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

$$\Delta C = (295136,66 - 230902,00) / 295136,66 = 0,22 = 22 \%$$

Таким чином, орієнтовне зменшення собівартості деталей з розробленої економно-легованої сталі в порівнянні з промисловою серійною сталлю Р6М5 становить 22 %.

Річна потреба виробництва у деталях з розробленої сталі складає 17000 кг/рік для потреб виробників інструментальної сталі та заводів з виготовлення

виробів із швидкорізальної сталі та 3000 кг/рік для потреб науково-дослідних інститутів.

Таким чином, річна потреба виробництва у виробках з розробленої сталі становить:

$$A_{\text{ст}} = 17000 + 3000 = 20000 \text{ кг/рік} \quad (5.2)$$

Відповідно, розраховано мінімальну ціну товару без врахування податку, при якій 100 % реалізація 20000 кг продукції щорічно компенсує витрати на проведення НДР впродовж 5 років становить:

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

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.

$$\begin{aligned} \text{Ц} &= (230902 + 230,90 \times 20000 + 923609,1 + 461804,5) / 20000 = \\ &= 391 \text{ грн/кг} \end{aligned}$$

Ціна виробів з промислової сталі Р6М5 була встановлена на рівні 500 грн/кг. При річному замовленні виробництва у 20 т, прибуток за 5 років складав:

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

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.

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

В результаті впровадження розробленої економно-легованої сталі РЗМЗФ2БІТ прибуток виробництва за 5 років буде становити:

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

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.

$$\Pi = 500 \times (20000 \times 5) - 230,9 \times (20000 \times 5) - 4618045,1 - 2309022,6 = 19982706,57 \text{ грн}$$

Отже, економічний ефект від впровадження нової економно-легованої сталі РЗМЗФ2БІТ за 5 років складатиме:

$$E_k = \Pi - \Pi_{\text{пс}} = 11632234,57 - 19982706,57 = 8350472,00 \text{ грн}$$

Таким чином, зниження собівартості розробленої сталі РЗМЗФ2БІТ відносно промислової Р6М5 на 22 %, дозволяє скоротити витрати на виготовлення товарів, приводячи до підвищення прибутку від їх реалізації у 1,7 разів.

Враховуючи спрощення процесу виготовлення деталей рекомендується розглянути підвищення річного обсягу замовлення з 20 до 40 т на рік, зі зниженням ціни товарів з 500 до 400 грн/кг. Це дозволить збільшити попит на товар, а орієнтовний річний економічний ефект при цьому складатиме 1666635,72 грн. Додаткові кошти можна використати для модернізації виробництва, що дозволить задовольнити підвищений попит.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Актуальність теми висока, оскільки попит на швидкорізальні сталі в Україні зростає, а вартість матеріалів пов'язана з витратами на виробництво та сировину. За даними Державної служби статистики, обсяг ринку інструментальних сталей у країні досягає 4,8 тисяч тонн, або 56 мільйонів гривень на річному рівні.

2. Збільшення попиту на продукцію машинобудування, як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках, сприяє росту попиту на швидкорізальні сталі.

3. Впровадження нової економно-легованої швидкорізальної сталі зі зниженим вмістом вольфраму та молібдену може значно знизити витрати на виробництво. Собівартість такої сталі становить 230902,00 грн/т у порівнянні зі стандартною сталлю Р6М5, чия собівартість дорівнює 295136,66 грн/т, що дозволяє знизити витрати приблизно на 22 %.

4. Передбачена річна потреба виробництва у виробах з розробленої сталі складає 20 тонн, що дає змогу розрахувати мінімальну ціну товару для компенсації витрат на НДР за ціною 391 грн/кг.

5. Впровадження розробленої сталі РЗМЗФ2БІТ забезпечує зростання прибутку від їх реалізації у 1,7 разів в порівнянні з прибутком від продажу сталі Р6М5, що відображає значний економічний ефект від інноваційного проекту.

6. Рекомендується розглянути можливість збільшення річного обсягу замовлення до 40 тонн зі зниженням ціни до 400 грн/кг, що може збільшити попит та забезпечити додатковий економічний ефект у розмірі 1666635,72 грн на рік.

7. Враховуючи наведені дані, можливості для українського виробництва розширюватися до міжнародного рівня є значними за умови сучасної науково-технічної інфраструктури та фінансової підтримки з боку інвесторів.

ВИСНОВКИ

1. Проведений огляд літературних джерел показав актуальність теми розробки економно-легованих швидкорізальних сталей на основі ніобію та титану, що забезпечують зниження вартості та собівартості інструментів при збереженні високих експлуатаційних характеристик.

2. В експериментальних умовах виготовлено лабораторні плавки сталі РЗМЗФ2БІТ, легованої ніобієм і титаном, з вмістом вольфраму 3,05% та молібдену 2,82%, у порівнянні зі сталлю Р6М5, де вміст цих елементів становить 6,10% та 5,20% відповідно.

3. Встановлено, що структура литої сталі РЗМЗФ2БІТ включає карбонітриди (TiNb)C, (VNb)C, TiC та NbC. Основні типи карбідів у відпаленому стані - це M_2C та MC.

4. Сталь РЗМЗФ2БІТ після відпалу характеризується меншим середнім розміром карбідів (1,31 мкм) та їх об'ємною долею (0,227 %) у порівнянні зі сталлю Р6М5 (1,58 мкм та 0,374 % відповідно), що забезпечує задовільну твердість 235 НВ.

5. Оптимальною температурою гартування для сталі РЗМЗФ2БІТ визначено 1180-1210 °С, що забезпечує вторинну твердість до 67 HRC після подальшого триразового відпуску. Червоностійкість сталі РЗМЗФ2БІТ на 1-2 HRC вища, ніж у сталі Р6М5.

6. За ключовими параметрами (вторинна твердість, червоностійкість, стійкість різального інструменту) сталь РЗМЗФ2БІТ перевершує сталь Р6М5, хоча дещо поступається за деякими показниками міцності.

7. Впровадження розробленої сталі РЗМЗФ2БІТ замість Р6М5 дозволяє знизити собівартість на 22 %, що забезпечує зростання прибутку в 1,7 разів. Річний економічний ефект оцінюється у 8 млн грн.

8. Отримані результати свідчать, що розроблена економно легована швидкорізальна сталь на основі ніобію та титану є перспективною для застосування у виробництві різального інструменту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: Справочник / И. Артингер // М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
2. Гуляев, А. П. Теория быстрорежущей стали / А. П. Гуляев // МиТОМ. №11, 1998. – С. 27–32.
3. 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.
3. ГОСТ 19265-73 Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. С изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6 [Чинний від 2019-08-12]. Минчермет, 1973.
4. 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.
5. 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.
6. Boccacini, M. Solidification of high speed steels / M. Boccacini, H. Goldenstein // International Materials Reviews. Vol.46, No.2, 2001. – P. 92-107.
7. 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.
8. 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.
9. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер // М.: Металлургия, 1975. – 584 с.

10. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин // М.: Металлургия, 1977. – 407 с.
11. Lyu, C. Effect of heat treatment on microstructure and impact toughness of a Tungsten-Molybdenum powder metallurgical high-speed steel / C. Lyu, J. Zhou, X. Zhang, Y. Yao, Y. Zhang // Materials Science & Engineering A. Vol.815, 2021. – P. 141-268.
12. Galda, E.J. The Effects of Mo and W on Solidification of High Speed Steels / E.J. Galda, R.W. Kraft // Metallurgical transactions, Vol. 5, 1973. – P. 1727-1733.
13. ГОСТ 19265-73 Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. С изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6 [Чинний від 2019-08-12]. Минчермет, 1979.
14. ТУ 14-1-3714. Прокат сортовой и изделия дальнейшего передела из быстрорежущей стали. Технические условия. М.: Металлургия, 1984.
15. ДЕСТ 28393-89. Прутки і смуги зі швидкорізальної сталі, отриманої методом порошкової металургії. Загальні технічні умови. Минчермет, 1989. – 10 с.
16. Chaus, A.S. Modifying Cast Tungsten-Molybdenum High-Speed Steels with Niobium, Zirconium, and Titanium / A.S. Chaus // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 47, No. 1, 2005. – P. 53-55.
17. Tauqir, A. Studies of Carbides in a Rapidly Solidified High-Speed Steel / A. Tauqir, H. Nowotny, P.R. Strutt // Metallurgical Transactions A. Vol. 21 A, 1990. – P. 3021-3030.
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. 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>
22. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. Зі змінами [Чинний від 2023-04-07]. К.: Міністерство внутрішніх справ (МВС), 2014.
23. ГОСТ 12.3.028-82 Система стандартів безпеки праці. Процеси обробки абразивним і ельборовим інструментом. Вимоги безпеки. [Чинний від 1985-01-01], 1982.
24. 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.
25. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2019-03-01]. Полтава: Державне підприємство Державний проектний інститут містобудування «Міськбудпроект», 2012.
26. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2019-02-01]. К.: Державний інститут «УкрНДІводоканалпроект», 2013.
27. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2019-02-01]. К.: Державний інститут «УкрНДІводоканалпроект», 2013.
28. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2019-11-01]. К.: ВГО «Український союз пожежної та техногенної безпеки», 2014.