

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра
(ступінь вищої освіти)

на тему «Збільшення міцності швидкорізальних сталей шляхом удосконалення
режимів термічного оброблення»

Виконав(ла): студент(ка) курсу, групи ІФ-222м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ЗЛОТНИК Артур Ігорович

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГЛОТКА Олександр Анатолійович

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент _____

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний

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 «Фізичне матеріалознавство»

Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ЗЛОТНИК Артур Ігорович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Збільшення міцності швидкорізальних сталей шляхом удосконалення режимів термічного оброблення

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент ГЛОТКА Олександр Анатолійович,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «_____» _____ 20__ року №_____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) хімічний склад та механічні властивості стандартних швидкорізальних сталей

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

1. Огляд літературних джерел;
2. Матеріали та методики досліджень;
3. Експериментальний розділ;
4. Охорона праці;
5. Економічний розділ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) Вертикальний переріз діаграми системи Fe–W–Cr–V при 18%W, 1%V, 4%Cr, В'язкість та міцність швидкорізальних сталей, Твердість та кількість залишкового аустеніту в швидкорізальній сталі P6M5 в залежності від температури гартування, Графік класичного режиму термічної обробки виробу зі сталі P6M5, Дефекти термічної обробки швидкорізальних сталей, Випробування на розтяг, Вплив термоциклічної термічної обробки на стійкість мітчика під час різання важкооброблюваного жароміцного сплаву, Установка та режим кріогенної обробки і низького відпуску зразків, Зміна маси зразків фрез зі сталі P6M5 під час випробувань на зношення, Мікроструктура зразків фрез із сталі P6M5

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	ГЛОТКА О.А., к.т.н., доцент		
4	КРУГЛІКОВА В.М., к.е.н., доцент		
5	НЕСТЕРОВ О.В., к.т.н., доцент		
н/к			

7. Дата видачі завдання « _____ » _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	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 «Літературний огляд»	13.10.2023	
3	Розробка розділу «Матеріали та методики досліджень»	27.10.2023	
4	Розробка розділу «Експериментальний розділ»	03.11.2023	
5	Розробка розділу «Охорона праці»	24.11.2023	
6	Розробка розділу «Економічний розділ»	30.11.2023	
7	Написання висновків та переліку посилань	17.12.2023	

Студент(ка)

_____ Артур ЗЛОТНІК
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Олександр ГЛОТКА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 93 с., 12 табл., 18 рис., 11 дод., 31 джерело.

РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ, ПІДВИЩЕНІ ТЕМПЕРАТУРИ РОБОТИ, ТЕРМОЦИКЛІЧНА ОБРОБКА, КРІОГЕННА ОБРОБКА, ЗНОСОТІЙКІСТЬ, КАРБІДНЕ ЗМІЦНЕННЯ, АУСТЕНІТ ЗАЛИШКОВИЙ

Об'єкт розробки – інструменти із швидкорізальних сталей.

Мета роботи – глибоке дослідження та оптимізація режимів термічного оброблення швидкорізальних сталей з метою досягнення підвищення їхньої міцності. Розробка спрямована на вдосконалення технологічних процесів та параметрів оброблення, які визначають властивості сталі, зокрема, збільшення твердості та тривалості служби різальних інструментів. Очікується, що результати досліджень дозволять виявити оптимальні термічні умови, сприяючи подальшому підвищенню продуктивності та ефективності виробництва, а також покращенню конкурентоспроможності вітчизняних та світових підприємств у галузі металургії та машинобудування.

Результати роботи – Для підвищення ефективності різання важкооброблюваних сплавів застосовується термоциклювання швидкорізальних сталей у конкретних температурних інтервалах. Інструмент піддається гартуванню та відпуску, причому цей процес включає два етапи охолодження в різних середовищах: соляній ванні та маслі. Такий підхід сприяє подрібненню структури, збільшенню кількості зносостійких карбідів та формуванню специфічних структур, що поліпшують експлуатаційні характеристики інструменту. Розроблена кріогенна установка дозволяє ефективно виконувати безперервне кріогенне оброблення ріжучих інструментів з низькою витратою рідкого азоту. Результати пробної обробки різних марок сталей підтверджують, що кріогенна обробка сприяє значному підвищенню зносостійкості інструментів для різання важкооброблюваних сплавів.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	7
1 Огляд літературних джерел.....	8
1.1 Вимоги до властивостей інструментальних матеріалів.....	8
1.2 Сталі для швидкорізального інструменту.....	9
1.3 Вплив легувальних елементів на властивості швидкорізальних сталей.....	11
1.4 Термічна обробка та властивості швидкорізальних сталей	17
1.5 Дефекти термічної обробки швидкорізальних сталей.....	22
2 Матеріали та методика дослідження.....	26
2.1 Випробування на розтяг.....	26
2.2 Дослідження мікроструктури.....	29
3 Підвищення механічних властивостей швидкорізальних сталей шляхом удосконалення режимів термічної обробки.....	34
3.1 Аналіз впливу методу термоциклювання на структуру та властивості швидкорізальних сталей для обробки важкооброблюваних сплавів.....	34
3.2 Застосування кріогенної обробки для підвищення зносостійкості швидкорізальних сталей.....	40
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	50
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	50
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	51
4.3 Заходи з виробничої санітарії.....	54
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	56
4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	57
5 Економіко-організаційна частина.....	62
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	62
5.2 Послідовний аналіз.....	63

	6	
5.3 Техніко-економічні розрахунки.....	67	
Висновки.....	75	
Перелік джерел посилань.....	77	
Додаток А.....	82	

ВСТУП

У контексті сучасного промислового та технологічного розвитку великою вагомістю набуває постійне вдосконалення властивостей матеріалів, зокрема, швидкорізальних сталей, які використовуються в виробництві різального інструменту. Забезпечення тривалої та ефективної експлуатації інструментів у виробництві стає ключовим завданням в галузі металургії та машинобудування.

Мета даної магістерської дипломної роботи полягає у глибокому вивченні та оптимізації режимів термічного оброблення швидкорізальних сталей з метою досягнення підвищення їхньої міцності. Важливість вибору та оптимального використання параметрів термічної обробки стає вирішальним фактором для досягнення високих показників продуктивності та тривалості служби різальних інструментів. Розвиток нових методів і технологій у цій області не лише може відкривати нові перспективи для промислового виробництва, але й покращувати конкурентоспроможність вітчизняних та світових підприємств.

Застосування передових наукових підходів та експериментальних методів у дослідженнях має на меті виявлення оптимальних термічних режимів, які сприятимуть підвищенню ефективності та якості швидкорізальних сталей. При цьому враховується не лише забезпечення оптимальних технічних характеристик, але й раціональне використання ресурсів та енергії. Дана робота покликана внести свій внесок у розвиток високотехнологічного виробництва та підвищити якість та довговічність різальних інструментів.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Вимоги до властивостей інструментальних матеріалів

У процесі різання ріжучі кромки інструменту перебувають під впливом дуже високих контактних напружень. У такому стані матеріал схильний до пластичного деформування. Опір матеріалу великим пластичним деформаціям характеризується твердістю. Таким чином, висока твердість є необхідною властивістю інструментального матеріалу. Саме висока твердість визначає принципову можливість використання матеріалів як інструментальних. Це матеріали, що мають або отримують (у результаті термічної обробки) високу твердість: інструментальні сталі, а також прості речовини (алмаз) і проміжні фази (карбіди, нітриди, оксиди).

Під час різання відбувається нагрівання ріжучої кромки інструменту. Температура в зоні різання тим вища, чим більша швидкість різання. Здатність матеріалу зберігати твердість під час нагрівання – теплостійкість – є важливою характеристикою, яка визначає продуктивність обробки.

У процесі різання інструменти піддаються впливу напружень (вигину - багатолезовий інструмент, крутіння - осьовий інструмент і рідше розтягування - протягання), а також динамічних навантажень. Тому інструментальний матеріал повинен володіти достатніми механічними характеристиками - високими границею міцності та ударною в'язкістю. При цьому треба мати на увазі, що інструментальні матеріали, які мають високу твердість, мають крихкий характер руйнування (тобто практично без пластичної деформації), тому зростання твердості супроводжується, зазвичай, зниженням інших механічних властивостей. Зважаючи на це, твердість має бути максимально можливою, тобто такою, за якої механічні властивості матеріалу забезпечують роботу інструменту без поломок і відколів ріжучої кромки.

Що вищий модуль пружності інструментального матеріалу, то більша його жорсткість, менші пружні стиснення в процесі різання, що забезпечує меншу шорсткість оброблюваної поверхні [1].

Температура в зоні різання залежить від теплопровідності та теплоємності інструментального матеріалу. Що вища теплопровідність, то інтенсивніше відведення тепла із зони різання. За вищої теплоємності матеріалу для його нагрівання до певної температури потрібна більша кількість теплоти. Тому під час різання в однакових умовах ріжуча кромка нагрівається тим менше, чим вища теплопровідність і теплоємність інструментального матеріалу.

Коефіцієнт теплового розширення бажано мати мінімальним. Об'ємні зміни під час нагрівання та охолодження інструменту в процесі різання призводять до розвитку термічної втоми. Крім того, зміни розмірів інструменту в процесі різання знижують точність обробки.

Інструментальний матеріал повинен мати досить високу хімічну стійкість. Це запобігає або знижує ймовірність появи адгезії (схоплювання) і виникнення дифузійного зносу (дифузія інструментального матеріалу в оброблюваний), небезпека якого виникає за великих швидкостей різання, через високі температури в зоні обробки.

1.2 Сталі для швидкорізального інструменту

Швидкорізальні сталі умовно підрозділяють на сталі помірної червоностійкості (за наявності до 2 % V) і сталі підвищеної червоностійкості (за наявності понад 2 % V або додатково легованої кобальтом). У результаті цього відбулося зниження середнього вмісту вольфраму в швидкорізальних сталях з 16,5 до 74 % при зростанні середнього вмісту молібдену з 0,6 до 4 % [1].

Для досягнення високої теплостійкості необхідно мати високолегований твердий розчин, у якому утруднена дифузія вуглецю, і високу стійкість проти коагуляції під час нагрівання зміцнювальної фази. Це реалізується завдяки тому, що швидкорізальні сталі легovanі сильними карбідоутворювальними компонентами, які й утворюють карбіди. Основними легувальними компонентами швидкорізальних сталей є вольфрам і молібден, які є хімічними

аналогами, до їхнього складу також обов'язково входять хром і ванадій. Залежно від наявності W і Mo сталі підрозділяються на вольфрамові, вольфрамомолібденові та молібденові.

Вольфраммолібденові сталі набагато дешевші, ніж аналогічні за властивостями вольфрамові сталі. Так, якщо відповідно до цін на світовому ринку прийняти вартість сталі P6M5 за 100 %, то вартість сталі P12 складе 120 %, а P18 170 % [2].

Необхідно також зазначити, що останнім часом розширилося використання швидкорізальних сталей з підвищеним вмістом вуглецю на 0,2% за низького вмісту вольфраму і молібдену (11P3AM3Ф2), а також сталей, легованих 0,05-0,10% N (P6AM5, P6AM5Ф3). Легування азотом підвищує експлуатаційні властивості інструменту. Розроблено і перспективні безвольфрамові швидкорізальні сталі типу 11M5Ф3, що мають властивості, близькі до сталі P6M5 [3].

Нині для виготовлення інструменту зі швидкорізальних сталей дедалі ширше застосовують методи порошкової металургії. У таких матеріалах немає карбідної неоднорідності й анізотропії властивостей, вони добре шліфуються за підвищеного вмісту ванадію (до 3,5 %), мають вищу червоностійкість і кращі ріжучі властивості. Виготовлення інструменту методами порошкової металургії є безвідходним способом виробництва.

Хімічний склад і властивості швидкорізальних сталей регламентовані ДСТУ EN ISO 4957:2007. Швидкорізальні сталі мають у своєму складі порівняно невисокий вміст вуглецю (0,7 ...0,95%) і досить високий вміст легувальних елементів (до 25%). Основними легувальними елементами є вольфрам (6...18%), хром (близько 4%), ванадій (1...5%). Для підвищення теплостійкості виробляються сталі, додатково леговані кобальтом (5...10%). У табл. 1.1 наведено марки і склад деяких швидкорізальних сталей.

Основна особливість швидкорізальних сталей – теплостійкість, вони зберігають високу твердість при нагріванні до температур понад 600 °С. Це пов'язано зі складним механізмом зміцнення сталей цього класу, що поєднує мартенситне перетворення з подальшим дисперсійним твердінням.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад деяких швидкорізальних сталей (ДСТУ EN ISO 4957:2007) [3]

Марка	Хімічний склад, мас. %					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
P18	0,7...0,8	17...19	0,5...1,0	3,8...4,4	1,0...1,4	–
P12	0,8...0,9	12...13	до 1,0	3,2...3,7	1,5...1,9	–
P9	0,85...0,95	8,5...10	до 1,0	3,8...4,4	2,0...2,6	–
P6M5	0,85	6,0	5,0	4,0	2,0	–
P6M3	0,9	6,0	3,3	3,3	2,2	–
P18Ф2	0,85...0,95	17...19	0,5...1,0	3,8...4,4	1,8...2,4	–
P18Ф2K5	0,85...0,95	17...19	0,5...1,0	3,8...4,4	1,8...2,4	5,0...6,0

1.3 Вплив легувальних елементів на властивості швидкорізальних сталей

Структура швидкорізальних сталей у відпаленому стані складається з фериту, в якому розчинена частина хрому, наявного в сталі, і карбідів легувальних елементів. Це карбіди на основі вольфраму і молібдену: Me_6C (1200HV) – основний карбід (у структурі сталей P18 і P6M5 він присутній у кількості близько 18%), хрому - $Me_{23}C_6$ (його твердість 1000HV, кількість близько 9%) і ванадію - MeC (2500HV, кількість 1,5-2%). Ці карбіди мають складний склад. Зі спеціальних карбідів на діаграмі (рис. 1.1) вказано лише карбід Me_6C [2]. Нижче рівноважної температури розчинення в сталі будуть присутні також MeC і $Me_{23}C_6$, що на діаграмі не вказано. Крім атомів основного карбідоутворювального компонента, в них присутні в певних кількостях атоми заліза та інших легувальних елементів. Зміцнювальна термічна обробка швидкорізальних сталей, що включає гартування і відпуск, повинна забезпечити високі значення твердості і теплостійкості. Цього можна досягти завдяки високій легованості твердого розчину, одержуваної під час гартування, та інтенсивному дисперсійному твердінню в процесі відпуску.

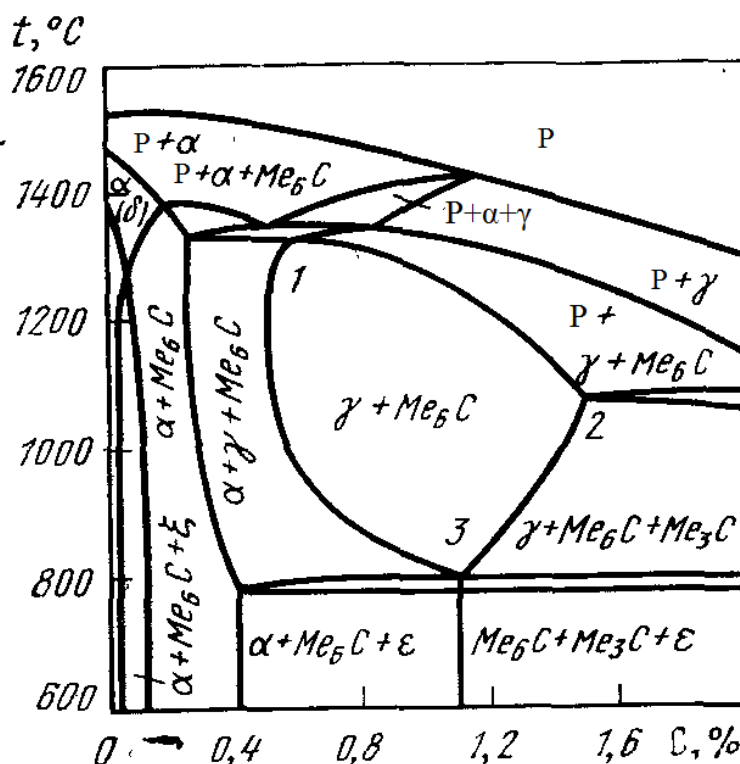
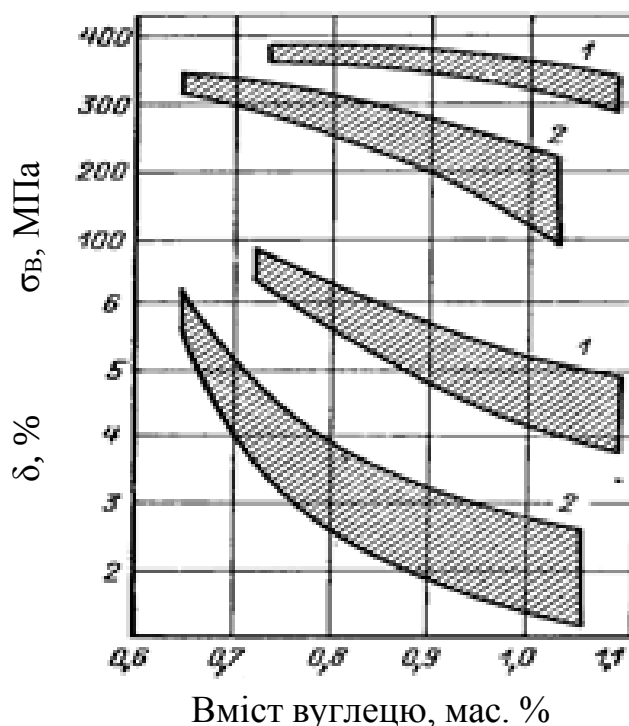


Рисунок 1.1 – Вертикальний переріз діаграми системи Fe–W–Cr–V при 18%W, 1%V, 4%Cr; ϵ – інтерметалід [2]

Вертикальний (політермічний) переріз діаграми стану системи Fe–Cr–W–V, характерний для швидкорізальних сталей, наведено на рис. 1.1. Аустеніт у швидкорізальних сталях утворюється під час нагрівання вище за 800-900 °C, однак за цих температур аустеніт не збагачений основними легувальними елементами і вуглецем. Тому гартування сталі від температури вище A_{c3} (лінії 1-3-2) на 30-50 °C, як прийнято для звичайних сталей, не може забезпечити головної властивості швидкорізальної сталі – червоностійкості. Червоностійкість досягається лише після високотемпературного нагріву під гартування до температур трохи нижчих за лінію солідуса A_4 (лінія 1-2), коли значна частина легованих карбідів розчиняється в аустеніті, збагачуючи його вольфрамом, молібденом, ванадієм, хромом і вуглецем. Повного розчинення в аустеніті карбиду Me_6C , а також Me_3C , як видно з діаграми стану, навіть за таких високих температур не відбувається. Підвищення вмісту вуглецю в сталі призводить до зниження температури гартування, оскільки лінія солідусу 1-2

знижується з 1330 °С (0,6 % С) до 1100 °С (1,5 % С). Діаграма також показує, що знеуглецювання швидкорізальної сталі (до % С <0,5-0,6) призводить до появи α -фази (область $\alpha + \gamma + \text{Me}_6\text{C}$ зліва від лінії 1-3). Надмірний вміст вуглецю, більший ніж необхідний для утворення спеціальних карбідів, може призвести до появи карбіду цементитного типу, що погіршує властивості сталі (рис.1.2).



1- сталь типу Р6М5; 2- сталь типу Р9

Рисунок 1.2 – Вплив вуглецю на міцність та в'язкість вольфрамових та вольфрамомолібденових сталей [4]

Вольфрам і молібден є основними легувальними елементами, що забезпечують червоностійкість. Тривалий час найбільше використовували вольфрамові сталі без молібдену (марки Р18, Р12, Р9). Однак гостра дефіцитність вольфраму призвела до часткової його заміни молібденом. Заміну вольфраму молібденом проводять, виходячи зі співвідношення $\text{Mo}:\text{W}=1 : 1,5$, проте загальний вміст молібдену в сталі не повинен бути більше 5 %. Відомі безвольфрамові швидкорізальні сталі на основі молібдену. Однак вони мають

суттєві недоліки (схильні до зростання зерна і перегріву, знеуглецювання, мають вузькі температурні інтервали гартування і відпуску тощо). У впливі вольфраму та молібдену є також суттєві відмінності. Це спостерігається при відпусканні. В'язкість сталей з молібденом при відпуску 250-300°C зростає значно більше. В'язкість, яка знижується при дисперсійному твердінні, залишається у молібденових сталях вищою, ніж у вольфрамових (рис. 1.3), оскільки молібден як горофільний елемент перешкоджає виділенню карбідних частинок по границях зерен.

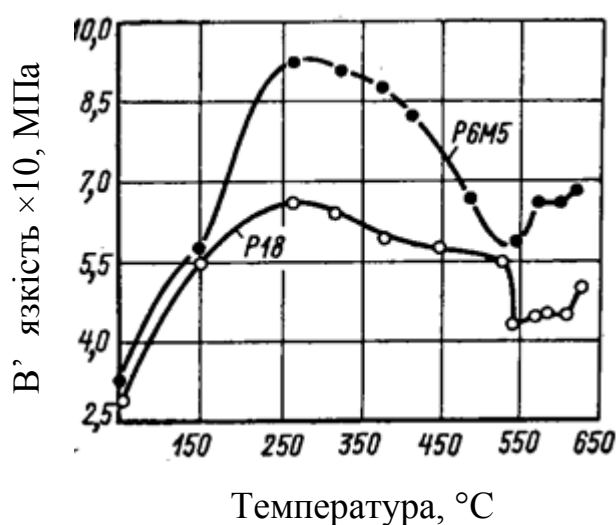


Рисунок 1.3 – В'язкість сталей P18 та P6M5 в залежності від температури відпуску (гартування на дрібне зерно) [2]

Вважається, що найоптимальніші властивості і раціональна вартість інструменту досягається при дотриманні умови $S(W + 1,5 Mo) = 12-13 \%$ [2]. За цим принципом розроблена найбільш широко застосовувана, в даний час сталь P6M5.

Вольфрам (молібден) утворює в сталі карбід Me_6C , який під час аустенітизації частково переходить у твердий розчин, забезпечуючи отримання після гартування легованого вольфрамом (молібденом) мартенситу. Ці легувальні елементи, а також ванадій ускладнюють розпад мартенситу під час нагрівання, забезпечуючи необхідну червоностійкість. Нерозчинена частина

карбіду Me_6C призводить до підвищення зносостійкості сталі. Таким чином, без вольфраму або молібдену не може бути швидкорізальної сталі. Наявність у сталі високого вмісту вольфраму призводить до погіршення теплопровідності сталі, що спричиняє ускладнення під час обробки тиском та необхідність сповільненого (ступінчастого) нагріву сталі під гартування, щоб уникнути появи тріщин. Крім того, вольфрамові сталі схильні до сильної карбідної неоднорідності. Часткова заміна вольфраму молібденом зменшує цей недолік.

Ванадій утворює в сталі найбільш твердий карбід VC (MeC) ($\text{HV } 2700\text{--}2800$). Максимальний ефект від введення в сталь ванадію досягається за умови, що вміст вуглецю в сталі буде достатнім для утворення великої кількості карбідів і для насичення твердого розчину. За мінімального вмісту ванадію в швидкорізальних сталях близько 1 % вміст вуглецю встановлюється в межах 0,7–0,8 %. Зі зростанням кількості ванадію в сталі вміст вуглецю має збільшуватися з розрахунку: на кожен 1% V - приріст вуглецю близько 0 2%. В основних марках швидкорізальних сталей дотримується така залежність між вмістом ванадію і вуглецю.

Карбід MeC , частково розчиняючись в аустеніті, збільшує червоностійкість і підвищує твердість після відпуску завдяки ефекту дисперсійного твердіння. Нерозчинена частина карбіду MeC збільшує зносостійкість сталі. Що вищий вміст ванадію у швидкорізальних сталях (а він доходить до 5 %), то вища зносостійкість внаслідок збільшення кількості найтвердішого карбіду. Однак при цьому погіршується шліфовність сталі. Широке застосування в інструментальній промисловості корундових і алмазних кругів дало змогу розширити виробництво високованадієвих сталей і тим самим досягти деякої економії вольфраму завдяки зменшенню частки нерозчиненого карбіду Me_6C , що також збільшує зносостійкість.

Хром у всіх швидкорізальних сталях міститься в кількості близько 4 %. Він є основою карбіду Me_{23}C_6 . Під час нагрівання для гартування цей карбід повністю розчиняється в аустеніті за температур, значно нижчих, ніж температури розчинення карбідів Me_6C і MeC . Унаслідок цього основна роль

хрому в швидкорізальних сталях полягає в наданні сталі високої прогартовуваності. Він впливає і на процеси карбідоутворення під час відпуску.

Кобальт застосовують для додаткового легування швидкорізальної сталі з метою підвищення її червоностійкості. Кобальт здебільшого перебуває у твердому розчині і частково входить до складу карбіду Me_6C . На думку деяких дослідників, він може утворювати під час відпуску інтерметаліди типу $(\text{Co}, \text{Fe})_7(\text{W}, \text{Mo})_6$. Кобальт збільшує стійкість проти відпуску і твердість швидкорізальних сталей (до HRC 67-70). Вплив кобальту на червоностійкість (збереження твердості HRC 60) описується у табл. 1.2 [4].

Таблиця 1.2 – Вплив кобальту на червоностійкість швидкорізальних сталей [4]

Вміст кобальту, мас. %	0	3	5	10	15
Червоностійкість, °C	610-615	620	630	640	650

До недоліків впливу кобальту слід віднести зниження міцності та в'язкості сталі, збільшення знеуглецювання. Вміст залишкового аустеніту після гартування в сталях із кобальтом зростає до 40 %, порівняно з ~ 25% для сталей без нього. Однак головною причиною, що стримує широке застосування кобальтових сталей, є дефіцитність і висока вартість кобальту [3].

Сірка, яка є небажаною домішкою, сприяє виникненню червоноламкості. У сталях з ледебуритною структурою роль сульфідів, що утворюються, стає менш значущою завдяки присутності в структурі значно більшої кількості надлишкових карбідів. Вони також можуть погіршувати властивості матеріалу. Крім того, сульфід за низьких температур початку затвердіння цих сталей часто виступають як центри кристалізації та присутні всередині великих евтектичних карбідів. Їхня кількість зменшується на межі зерен. Для зменшення вмісту сірки (до 0,015 %) застосовують електрошлаковий переплав [4].

Фосфор також є небажаною домішкою. При вмісті фосфору більше 0,02-0,03 % помітно знижується в'язкість і міцність, і збільшуються спотворення в гратці мартенситу [4].

1.4 Термічна обробка та властивості швидкорізальних сталей

Гартування. Нагрівання під гартування швидкорізальних сталей має забезпечити розчинення в аустеніті великої кількості карбідів. Карбід на основі хрому Me_{23}C_6 повністю розчиняється в аустеніті за $1100\text{ }^\circ\text{C}$, основний карбід швидкорізальних сталей Me_6C інтенсивно розчиняється за температури понад $1200\text{ }^\circ\text{C}$, найменш розчинним є карбід MeC на основі ванадію, який розчиняється за більш високих температур.

Таким чином, для забезпечення високої легованості твердого розчину температура гартування швидкорізальних сталей має бути вищою за $1200\text{ }^\circ\text{C}$, тобто перевищувати температуру розчинення основного карбіду. Карбід Me_6C на основі вольфраму розчиняється в аустеніті за температур вищих, ніж карбід на основі молібдену, тому температура гартування вольфрамових сталей також вища, ніж у сталей з молібденом ($1270 - 1290\text{ }^\circ\text{C}$ для P18 і $1210 - 1230\text{ }^\circ\text{C}$ для P6M5).

Після гартування в структурі залишається частина нерозчинених – надлишкових карбідів. Переважно це карбіди евтектичного походження, розчинення яких можливе тільки в рідкій фазі (оплавлення інструменту неприпустиме), і частина вторинних карбідів. Роль надлишкових карбідів – стримування зростання зерна (при великому зерні знижуються міцність і в'язкість) під час нагрівання під гартування, яке вимушено виконується від високих температур. При сповільненому процесі охолодження з високих температур, наприклад, на повітрі, може відбуватися виділення карбідів. Це призводить до збіднення твердого розчину у легувальних елементах, що негативно впливає на різальні характеристики матеріалу (див. рис. 1.4) [6-8].

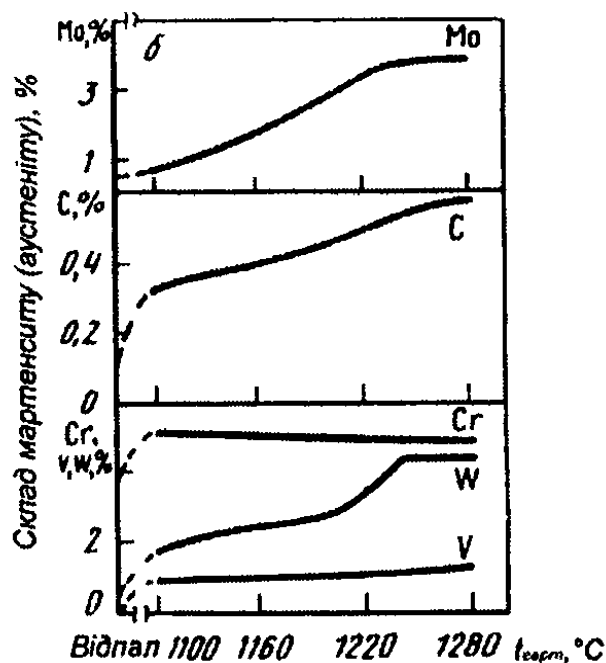


Рисунок 1.4 – Вплив температури аустенізації сталі Р6М5 на склад твердого розчину після гартування [9]

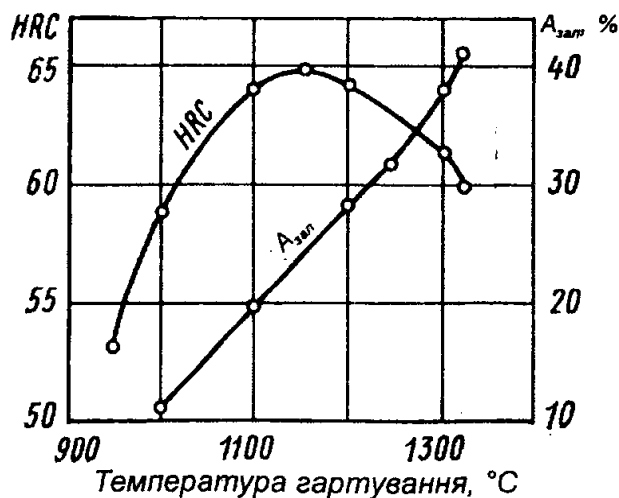


Рисунок 1.5 – Твердість та кількість залишкового аустеніту в швидкорізальній сталі Р6М5 в залежності від температури гартування [10]

Висока концентрація вуглецю і легувальних компонентів в аустеніті призводить до зниження температур початку (M_n) і кінця (M_k) мартенситного перетворення. Температура M_k лежить у діапазоні від'ємних температур, тому в структурі загартованих швидкорізальних сталей зберігається досить велика (до

30%) кількість залишкового аустеніту (рис.1.5). Таким чином, структура після гартування - мартенсит гартування (M_r), карбіди (К) і залишковий аустеніт ($A_{зал}$).

Відпуск. Під час відпуску швидкорізальних сталей має бути реалізовано: дисперсійне твердіння, зняття гартівних напружень, тобто перетворення мартенситу гартування на мартенсит відпуску ($M_{відп}$), а також перетворення залишкового аустеніту на мартенсит (аустеніт не має необхідної твердості). Ці завдання вирішуються, по-перше, вибором температури ізотермічної витримки під час відпуску і, по-друге, завдяки тому, що відпуск виконується багаторазово.

Відпуск загартованої сталі за температури 150-200 °С спричиняє виділення з мартенситу карбідів цементитного типу, при цьому концентрація легувальних компонентів у твердому розчині мало змінюється. Твердість сталей при цьому практично постійна. Її значення падають при підвищенні температури відпуску до 300 °С за рахунок коагуляції карбідів, що виділилися. При більш високих температурах відпуску відбувається виділення з твердого розчину великої кількості дисперсних карбідів на основі легувальних елементів, тобто дисперсійне твердіння. У результаті цього твердість зростає і досягає максимуму при 550-570 °С. Твердість, одержувана в результаті високотемпературного відпуску, називається вторинною (на відміну від високої твердості після гартування - первинної). Для відпуску призначається саме ця температура, що забезпечує отримання максимальної твердості. Підвищення температури вище оптимальної призводить до коагуляції дисперсних карбідів, розпаду мартенситу і, отже, до зниження твердості.

Характерно, що провал твердості в результаті відпуску при 300 °С спостерігається тільки для загартованої сталі. У тому випадку, якщо проводитися нагрів сталі, раніше відпущеної на максимальну твердість цього провалу немає.

Після відпуску проводять контроль твердості, потім виконують остаточне шліфування (заточування) інструменту. Для зняття напружень, що виникли при цьому, інструмент іноді піддають низькотемпературному відпуску (200-300°С).

Технологія термічної обробки. Класична зміцнювальна термічна обробка інструменту зі швидкорізальних сталей складається з операцій гартування і

триразового (дворазового) відпуску за 550-570 °С з ізотермічною витримкою 1 год. (рис.1.6) [3].

Нагрівання під гартування здійснюється з попереднім підігріванням за температур, що перевищують температуру перетворення (на практиці близько 850 °С у печі та 1050 °С у розправлених солях). Це сповільнює нагрівання до температур гартування, що запобігає появі термічних напружень внаслідок швидкого нагрівання. Витримка під час підігріву 15-20 с на 1 мм діаметра (товщини), під час остаточного нагрівання близько 10 с на 1 мм. Для попередження знеуглецювання поверхневих шарів інструменту, що призводить до втрати твердості, нагрівання під гартування здійснюють у розплавлених солях (BaCl_2 під час остаточного нагріву, $\text{BaCl}_2 + \text{NaCl}$ під час підігріву).

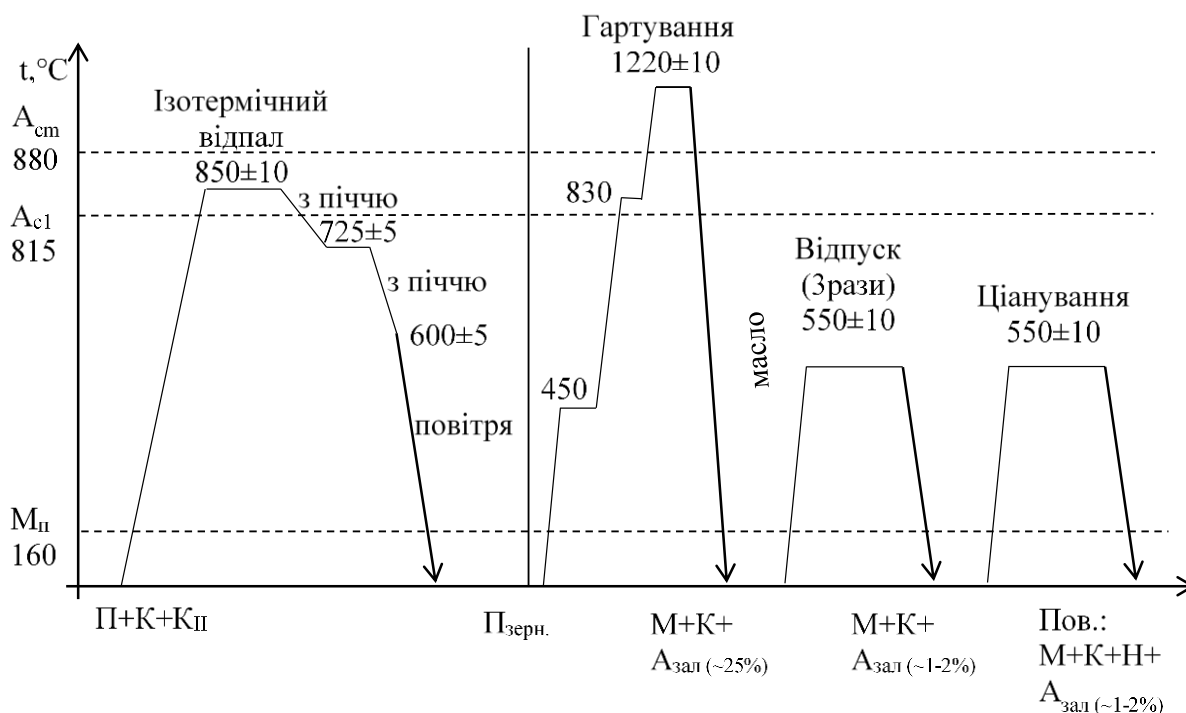


Рисунок 1.6 – Графік класичного режиму термічної обробки виробу зі сталі Р6М5 [10]

Висока легованість аустеніту дає змогу виконувати охолодження при гартуванні з невисокими швидкостями (масло або гарячі середовища). Правильність вибору температури гартування оцінюють за величиною аустенітного зерна, що виявляється травленням мікрошліфа загартованої сталі. Зерно має відповідати балу 11-10 стандартної шкали. Така структура забезпечує

необхідне поєднання властивостей: високі значення твердості й теплостійкості та задовільні міцність і витривалість. Підвищення температури гартування понад оптимальну (перегрів) призводить до зростання твердості і теплостійкості, але міцність і в'язкість при цьому знижуються через зростання зерна. Гартування від температур, нижчих за оптимальні (недогрів), призводить до протилежного ефекту. Відпуск може здійснюватися в солях (селітрах) або з нагріванням у повітряній атмосфері. Під час ізотермічної витримки в процесі відпуску за 550-570 °С карбіди виділяються як з мартенситу, так і з аустеніту. При цьому відбуваються: відпуск мартенситу гартування (він перетворюється на мартенсит відпуску $M_{\text{гарт}} \rightarrow M_{\text{відп}}$), зняття гартівних напружень, а також збіднення аустеніту вуглецем і легувальними елементами. Наслідком останньої обставини є підвищення температур $M_p - M_k$, внаслідок чого під час охолодження після ізотермічної витримки відбувається перетворення залишкового аустеніту на мартенсит ($A_{\text{зал}} \rightarrow M_{\text{гарт}}$).

Основна кількість залишкового аустеніту перетворюється на мартенсит у результаті першого відпуску. Однак у вольфрамових сталях це перетворення не проходить повністю. Їхня структура після першого відпуску складається з мартенситу відпуску, мартенситу гартування (він утворився під час охолодження після відпуску залишкового аустеніту), невеликої кількості залишкового аустеніту та карбідів, які є як надлишковими, так і тими, що виділилися під час відпуску. У процесі другого відпуску відбувається практично повне перетворення аустеніту (структура – $M_{\text{відп}} + M_{\text{гарт}} + K$). Третій відпуск виконують для зняття залишкових напружень, що виникли внаслідок мартенситного перетворення, яке відбулося в процесі другого відпуску (структура $M_{\text{відп}} + K$). Для вольфрамомолібденових сталей з меншою стійкістю залишкового аустеніту достатньо проведення дворазового відпуску. На рисунку 1.7 представлена структура, яку отримали після класичної обробки на прикладі сталі Р6М5. Висока твердість сталі після процесу відпуску обумовлена збереженням високолегованої мартенситної структури, розподіленою твердінням та перетворенням аустеніту у мартенсит [10].



Рисунок 1.7 – Мікроструктура сталі Р6М5 після оптимального режиму термічної обробки [2]

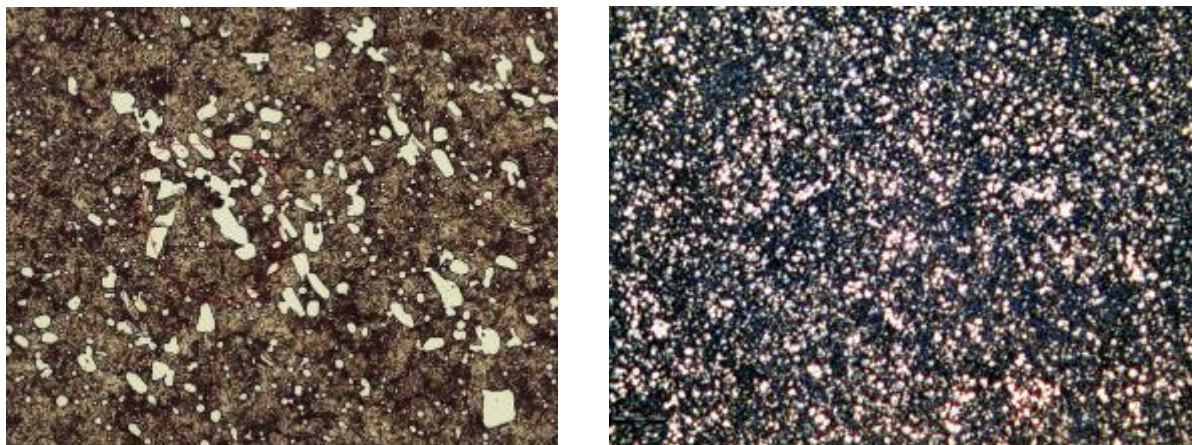
Процес виділення карбідів із твердого розчину – дифузійний, тобто залежить від часу. Встановлено, що за прийнятих температур відпуску тривалість ізотермічної витримки має становити 1 год. Як термічну обробку, що знеміцнює, використовують відпал, що включає нагрівання вище за температуру перетворення (840-860 для вольфрамових і 800-830 °С для вольфрамомолібденових сталей), тривалу витримку при цій температурі – щонайменше 3 години та наступне досить повільне охолодження зі швидкістю не більше ніж 25-30 °С/год. Відпал повинен забезпечити структуру зернистого перліту і мінімальну твердість для поліпшення обробки різанням.

1.5 Дефекти термічної обробки швидкорізальних сталей [5]

Карбідна неоднорідність уявляє збережені ділянки ледебуритної евтектики в прокатному металі (рис. 1.8, а). Вона визначається насамперед металургійним переділом, а саме: кристалізацією злитка і його гарячою пластичною деформацією. Сильна карбідна неоднорідність значно зменшує міцність, в'язкість і стійкість інструменту. Зменшення карбідної неоднорідності досягається комплексом заходів під час металургійного переділу. Радикальним

способом усунення карбідної неоднорідності є виготовлення інструменту методами порошкової металургії (рис. 1.8, б).

Зневуглецювання поверхні інструменту під час термічної обробки зумовлене поганою розкисленістю високотемпературної соляної ванни і надмірно тривалою витримкою під час аустенітизації. Перегрів під час аустенітизації призводить до надмірно сильного зростання зерна аустеніту порівняно з нормально нагрітою сталлю.



а

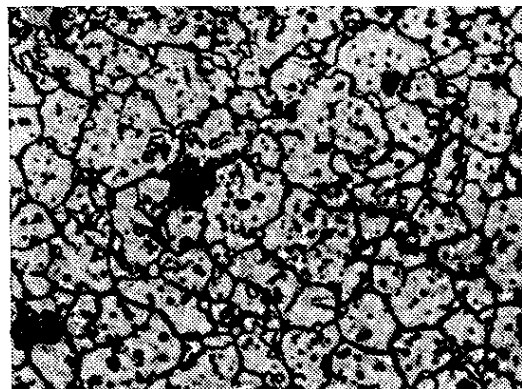
б

а – карбідна неоднорідність, б – порошкова сталь

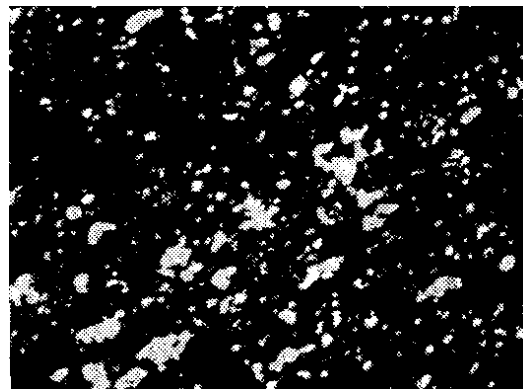
Рисунок 1.8 – Мікроструктура сталі P6M5, $\times 500$ [5]

Ця відмінність проявляється в загартованому стані та після відпуску в розподілі карбідної фази на границях колишніх зерен аустеніту (рис. 1.9). За значного перевищення встановлених температур аустенітизації може статися перепал - оплавлення границь зерен. Уникнення обох дефектів вимагає більш жорсткого контролю температури аустенітизації. Перегрів можна виправити шляхом подальшого відпалу і повторного гартування, перепал не виправити.

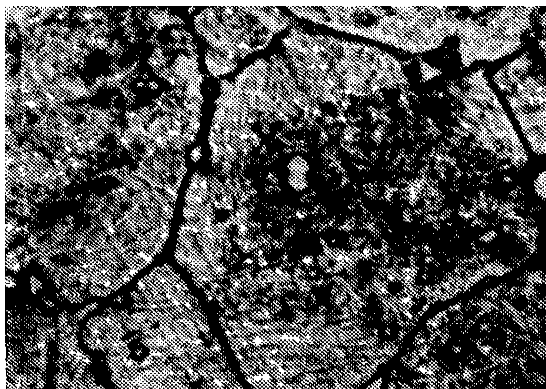
Тріщини можуть бути зумовлені як надмірно швидким нагріванням у соляних ваннах, без достатнього попереднього підігріву, так і прискореним охолодженням в області температур мартенситного перетворення.



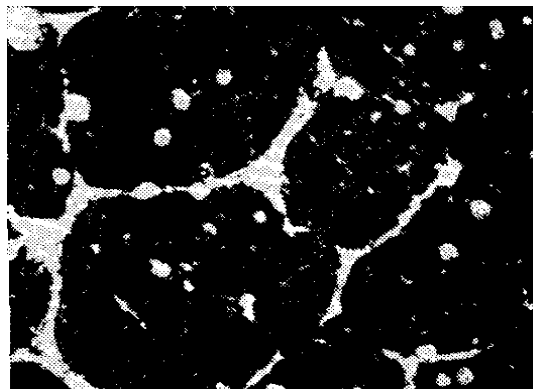
а



б



в



г

а, б – нормальний нагрів при аустенізації 1230 °С; в, г – перегрів 1265 °С;
а, в – гартування; б, г – гартування та триразовий відпуск

Рисунок 1.9 – Мікроструктура швидкорізальної сталі Р6М5, $\times 500$ [5]

Нафталіновий злам (рис. 1.10) уявляє грубозернистий злам зі своєрідними блискітками. Зазвичай такий дефект проявляється після повторного гартування недостатньо відпаленої сталі. Ненормальне зростання зерна під час повторного гартування швидкорізальної сталі, що призводить до нафталінового зламу, відбувається в результаті первинної рекристалізації аустеніту, зумовленої внутрішнім наклепом, яка розвивається (ймовірно, через вплив присутньої дисперсної карбідної фази) з малої кількості центрів. Для усунення нафталінового зламу перед повторним гартуванням необхідно провести відпал.

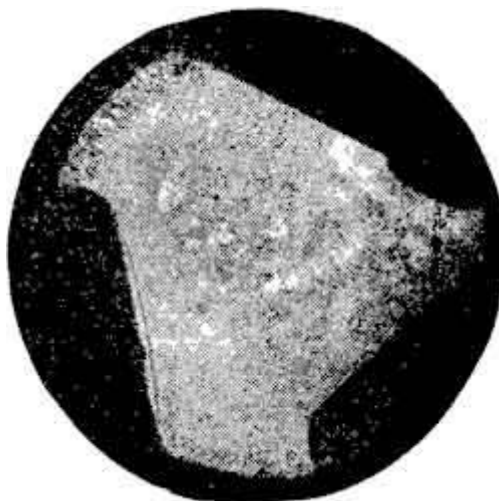


Рисунок 1.10 – Нафталіновий злам швидкорізальної сталі [2]

Низька твердість (HRC 58-62) після гартування і багаторазового відпуску може бути зумовлена низькою температурою нагрівання під час аустенітизації, що призводить до недостатнього легування мартенситу, а це в свою чергу спричиняє знеміцнення під час відпуску; низьким або високим нагріванням під час відпустки (до або після піку вторинної твердості); знеуглецюванням поверхні; стабілізацією залишкового аустеніту між гартуванням і відпуском, що призводить до збереження великої кількості залишкового аустеніту.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Випробування на розтяг

Метод випробування на розтяг дозволяє при кімнатній температурі визначити такі важливі характеристики матеріалу як границя пропорційності, границя пружності, границя плинності, границя міцності, відносне видовження та відносне звуження після розриву. Дослідження виконують за ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури [11].

Методи відбору зразків.

Вирізання заготовок для зразків проводять на металорізальних верстатах, ножицях, штампах шляхом застосування кисневого і анодно-механічного різання і іншими способами, передбачаючи припуски на зону металу зі зміненими властивостями при нагріві і механічній обробці.

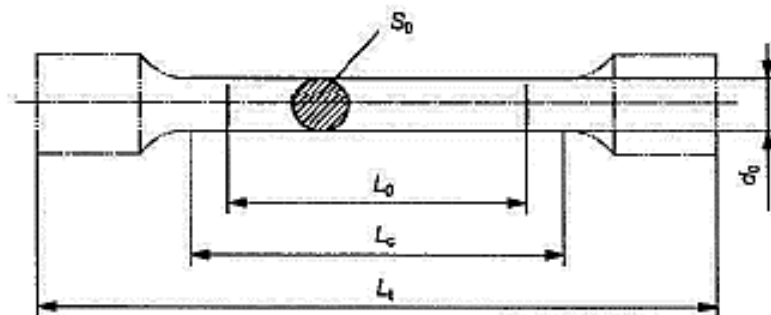
Місця вирізання заготовок для зразків, кількість їх, напрям подовжньої осі зразків по відношенню до заготовки, величини припусків при вирізці мають бути вказані в нормативно-технічній документації на правила відбору проб, заготовок і зразків або на металопродукцію.

Зразки рекомендується виготовляти на металорізальних верстатах. При виготовленні зразків вживають заходи (охолодження, відповідні режими обробки), що унеможливають зміни властивостей металу при нагріві або наклепі, що виникають в результаті механічної обробки. Глибина різання при останньому проході не повинна перевищувати 0,3 мм.

За відсутності інших вказівок в нормативно-технічній документації на металопродукцію значення параметрів шорсткості оброблених, поверхонь Ra зразків повинно бути не більше 1,25 мкм – для поверхні робочої частини циліндричного зразка.

Випробування проводять на двох зразках, якщо інша кількість не передбачена в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

Для випробування на розтяг застосовуємо пропорційні циліндричні зразки (рис.2.1) діаметром в робочій частині 3,0 мм з початковою розрахунковою довжиною $l_0=5,65$ мм.



D_0 – початковий діаметр робочої частини циліндричного зразка;

L_c – довжина робочої частини;

L_0 – початкова розрахункова довжина;

L_t – загальна довжина зразка;

S_0 – початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка

Рисунок 2.1 – Пропорційний циліндричний зразок для проведення випробування на розтяг [11]

Форма і розміри голівок і перехідних частин циліндричних зразків визначаються способом кріплення зразків в захопленнях випробувальної машини. Спосіб кріплення повинен попереджати прослизання зразків в захватах, зминання опорних поверхонь, деформацію голівок і руйнування зразка в місцях переходу від робочої частини до голівок і в голівках. Робоча довжина зразків для даного випробування складає 50 мм. Зразки маркують поза робочою довжиною зразка.

Підготовка до випробування.

Для визначення початкової площі поперечного перерізу F_0 необхідні геометричні розміри зразків вимірюють з похибкою не більше $\pm 0,5\%$. Вимірювання розмірів зразків до випробування проводять не менше, ніж в трьох

місцях – в середній частині і на межах робочої довжини. За початкову площу поперечного перерізу зразка в його робочій частині F_0 приймають найменше з отриманих значень на підставі зроблених вимірів та округлюють до 0,01. Величину початкової розрахункової довжини l_0 округлюють у більшу сторону: для зразків з $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ – до найближчого числа, кратного 5. Початкову розрахункову довжину l_0 з похибкою до 1% обмежують на робочій довжині зразка кернами, рисками або іншими мітками.

Для перерахунку відносного видовження після розриву δ з віднесенням місця розриву до середини і для визначення відносного рівномірного видовження δ_p по усій робочій довжині зразка рекомендується наносити мітки через кожні 5мм. Мітки проводять за допомогою ділильних машин або вручну із застосуванням металевої лінійки. На зразках з малопластичних металів мітки наносять способами, що виключають ушкодження поверхні робочої частини зразка (накаткою ділильних сіток або штрихів, фотоспособом, барвником, олівцем). Допускається мічення на перехідних частинах зразка шляхом керніння або іншим способом.

Початкову площу поперечного перерізу F_0 для зразків складної форми визначають з використанням розрахункових формул або за масою. Спосіб визначення початкової площі поперечного перерізу F_0 для таких зразків має бути обумовлений в нормативно-технічній документації на металопродукцію.

На підставі отриманих даних будують діаграму розтягу (рис. 2.2.), за допомогою якої можна визначити такі характеристики, як границя пропорційності, границя пружності, границя текучості, границя міцності.

Розрізняють умовні нормальні напруження σ та істинні нормальні напруження S . Умовні напруження σ_i , МПа, в будь який момент випробування визначають за формулою:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_0} \quad (2.1)$$

де P_i – навантаження, МН(Н);

Підготовка металографічних шліфів зазвичай включає кілька етапів: вирізання зразка і підготовка його поверхні, шліфування, полірування та травлення.

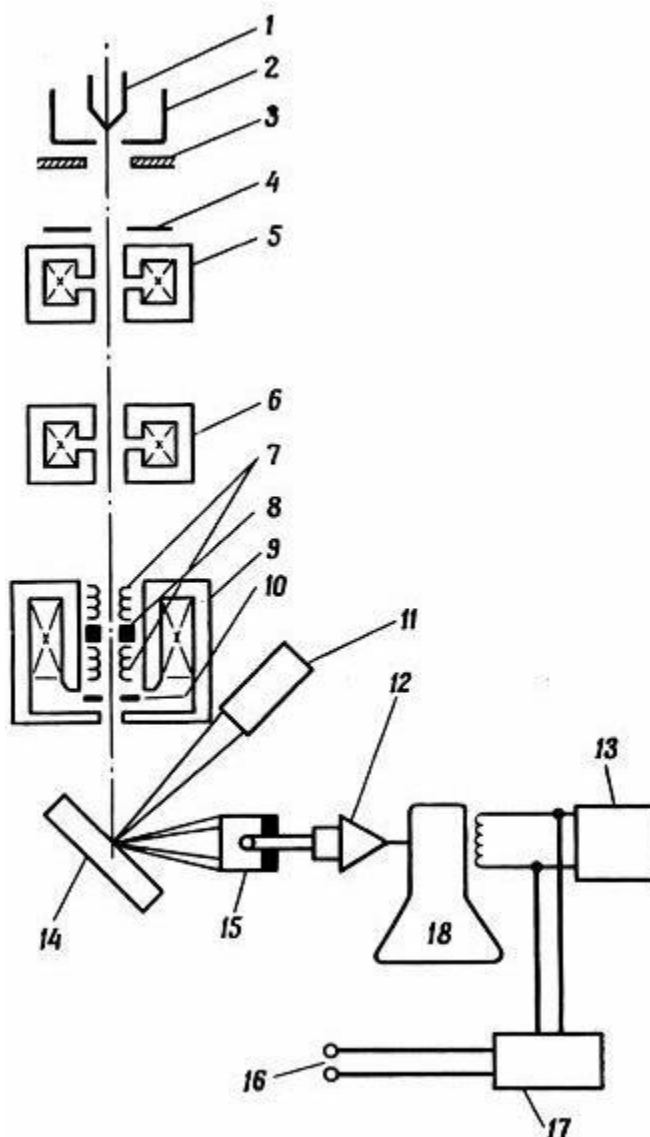
Шліфування розпочинається з абразивної обробки, яка полягає у вирізанні нерівностей поверхні за допомогою абразивних частинок. Цей процес виконується на кількох етапах, поступово зменшуючи зернистість абразивних частинок. Ініціюючи шліфування на папері з більшим абразивним зерном (№ 60), переходять до більш дрібного паперу, закінчуючи на папері № 220...280. Зразок шліфується, невеликим тиском прикладаючи його до шліфувального диска. Під час переходу на більш тонкий папір зразок очищається від наждачного пилу, повертаючи його на кут 90 градусів, і шліфується до повного видалення слідів попереднього етапу обробки.

Після тонкої шліфовки зразок промивають струменем води для видалення абразивних частинок і піддають поліруванню. Механічне полірування виконується на спеціальному полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий фетром або тканиною. Диск змочують полірувальною рідиною, що містить частинки полірувального порошку (оксид алюмінію або оксид хрому) у воді. Зразок необхідно слабо притискати до диска. Процес полірування триває 8...10 хвилин, іноді трошки довше, залежно від початкового стану поверхні, властивостей сплаву і використовуваної полірувальної рідини.

Полірування завершується, коли мікрошліф набуває дзеркальної поверхні. Після цього шліф промивають водою, витирають фільтрувальним папером і оглядають під мікроскопом при збільшенні в 100...150 разів. На полірованому шліфі чітко виділяються неметалеві включення, мікропори і тріщини, а також фази, твердість яких відрізняється від твердості основної структурної складової. Мікроструктуру вивчають за допомогою оптичного та растрового електронного мікроскопів.

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) призначений для вивчення та аналізу мікроструктурних характеристик сплавів. Він забезпечує отримання зображень мікрорельєфу поверхні зразків з високою роздільною здатністю та значною глибиною різкості. Також мікроскоп дозволяє проводити аналіз

хімічного складу дослідженої ділянки зразка за допомогою рентгенівського мікроаналізатора. Електроннооптичну схему РЕМа зображено на рисунку 2.3.



1 – катод; 2 – фокусуючий електрод; 3 – анод; 4 – діафрагма; 5,6 – конденсорні лінзи; 7 – котушка подвійного відхилення; 8 – стигматор; 9 – об’єктивна лінза; 10 – діафрагма для обмеження розміру пучка; 11 – детектор рентгенівського випромінювання; 12 – підсилювач; 13 – генератор сканування; 14 – зразок; 15 – детектор вторинних електронів; 16 – клеми для підключення відхиляючої системи; 17 – блок регулювання збільшенням; 18 – ЕПТ

Рисунок 2.3 – Схема електронної оптики растрового електронного мікроскопа з мікроаналізатором [12]

Електрони виходять з вольфрамового катода, який нагрівається до 2430°C , та прискорюються в електричному полі, що створюється різницею потенціалів (до 50 кВ) між катодом 1 і анодом 3. За допомогою конденсорних лінз 5 і 6, а також об'єктивної лінзи 9, формується вузький зонд розміром 0,1-3 мкм. Змінюючи струм у лінзах, регулюють інтенсивність та фокусування зонда на поверхні зразка за рахунок взаємодії магнітного поля лінз з пучком електронів.

Вузький сфокусований пучок електронів може залишатися нерухомим або розгортатися в растр за допомогою генератора сканування 13 та відхиляючої системи 7. Синхронно зі скануванням зонда на екрані електроннопроменевої трубки (ЕПТ) 18 формується зображення.

Під час взаємодії первинних електронів із зразком відбуваються такі процеси: відбиття електронів внаслідок пружного розсіяння, поглиблення електронів, утворення вторинних електронів та характеристичного рентгенівського випромінювання.

Відбиті електрони – це пружнорозсіяні електрони з такою самою довжиною хвилі, як і у первинних. Слабко зв'язані електрони, викинуті під час непружної взаємодії з первинними електронами, емітуються з зовнішніх оболонок атомів зразка і називаються вторинними електронами. При взаємодії первинних електронів із електронами внутрішніх оболонок атомів зразка виникає також характеристичне рентгенівське випромінювання. Енергія рентгенівських квантів визначається хімічним елементом.

Вторинна електронна емісія виникає навколо місця падіння зонда від усіх точок складного рельєфу. Сигнали від електронів, які виходять з поверхні зразка, перетворюються в електричні імпульси за допомогою детектора 15, встановленого біля зразка. Після проходження через підсилювач 12, вони передаються в модулятор електронно-променевої трубки 18. Сканування електронного зонда по поверхні об'єкта та його відображення на екрані ЕПТ здійснюються синхронно з генератором сканування 13, тому кожній точці на зразку відповідає точка на екрані ЕПТ.

При русі зонда відбувається зміна кількості розсіяних електронів на екрані ЕПТ внаслідок зміни локальних характеристик зразка, таких як частки інших фаз чи рельєф поверхні. Це призводить до зміни яскравості точки на екрані, що створює контраст та формує зображення поверхні зразка.

У РЕМ використовують два види контрасту: хімічний контраст, залежно від атомного номеру елементів, і топографічний контраст, пов'язаний з рельєфом поверхні зразка.

Хімічний контраст виникає через те, що ділянки з великим атомним номером виглядають більш яскраво, оскільки кількість розсіяних електронів пропорційна атомному номеру елемента. Топографічний контраст, навпаки, залежить від розташування рельєфу під різними кутами до напрямку падіння зонда. Більше електронів реєструється від ділянок рельєфу з більшим кутом до напрямку зонда.

Глибина зображення в РЕМ викликає враження об'ємності структури поверхні, що особливо важливо при вивченні зламів. Контраст зображення при реєстрації струму поглиблення протилежний контрасту у відбитих (розсіяних) та вторинних електронах.

Збільшення зображення у РЕМ визначається відношенням лінійних розмірів растра на екрані ЕПТ і растра на зразку. Розмір растра на об'єкті можна регулювати за допомогою сили струму в растрових котушках. Загальне збільшення може коливатися від 50 до 200 тис. разів і значно перевершує можливості світлового мікроскопа [12].

3 ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБИ

3.1 Аналіз впливу методу термоциклювання на структуру та властивості швидкорізальних сталей для обробки важкооброблюваних сплавів

Відомий спосіб термообробки заєвтектоїдної сталі, що містить менше 10% легуючих елементів, який включає високотемпературну аустенізацію, ізотермічне гартування з витримкою за температури 480...720°C до повного перетворення аустеніту в перліт, повторне нагрівання до температури аустенізації нижче температури повного розчинення карбідів, подальше охолодження з температур гартування і відпуск. Відомий спосіб забезпечує отримання дрібного зерна й оптимальний розподіл дисперсних карбідів у структурі, запобігає утворенню гартівних мікротріщин, що позитивно позначається на властивостях. У результаті втомна міцність підвищується в 2,5...3 рази, границя плинності при стисненні на 30...35%, трохи збільшується зносостійкість заєвтектоїдної сталі.

Однак наведений спосіб термообробки неприйнятний для швидкорізальної сталі і характеризується невисокими значеннями таких властивостей інструменту, як стійкість, міцність на згин, теплостійкість тощо. Це зумовлено недостатньо високим ступенем легування твердого розчину карбідоутворювальними елементами через низьку температуру нагріву під гартування і малу кількість циклів (два).

Відомий також спосіб термічної обробки литої швидкорізальної сталі, який включає підігрів вище за температуру поліморфного перетворення, термоциклювання, гартування і відпуск; а нагрівання під гартування поєднують з останнім нагріванням до верхньої температури при термоциклюванні. Причому під час термоциклювання нагрівання здійснюють до температури на 20...50°C нижче температури плавлення, що відповідає температурі стандартного гартування, а охолодження – до температури, що лежить не нижче 800°C.

Проводять додаткове охолодження з нижньої температури термоциклювання до 700°C , витримують 4...8 годин і потім остаточно охолоджують до кімнатної температури.

При здійсненні зазначеного способу оптимальна кількість циклів при термоциклюванні досягає 5...7 і залежить від ступеня неоднорідності структури. Причому верхня і нижня границі термоциклювання обмежені вузьким температурним інтервалом, що лежить між температурою евтектоїдного перетворення і температурою стандартного гартування; коли виключається можливість виконання поліморфного перетворення. Термоциклювання на всіх стадіях термообробки проводять за постійних значень верхньої і нижньої температури [2,3,9].

Недоліком цього способу є тривалість процесу (4...8 годин) і низькі значення стійкості інструменту, виготовленого з нелитої швидкорізальної сталі. Запропонованим способом усувається сітка карбідної евтектики тільки в литій швидкорізальної сталі, через яку весь литий інструмент дуже крихкий і погано працює при різанні важкооброблюваних сплавів. А для інструменту з нелитої, зокрема, прокованої і відпаленої або порошкової швидкорізальної сталі з уже роздробленою механічним або іншими способами карбідною сіткою відомий спосіб мало ефективний.

Найбільш близьким до пропонованого є спосіб термічної обробки різального інструменту зі швидкорізальної сталі, що включає попередню обробку шляхом багаторазового нагрівання до температури $610^{\circ}\text{C}...A_1$ з охолодженням у маслі, підігрів і потім термоциклювання в інтервалі між температурою початку мартенситних перетворень сталі (160°C) і її температурою плавлення (1305°C) з ізотермічною витримкою в захисному середовищі, після чого проводять остаточне гартування від температури останнього нагріву під час термоциклювання і відпуск. Причому як захисне середовище використовують розплави хлористих солей, в які додатково вводять карбонат барію (або калію) і карбід кремнію (або кальцію). У результаті термообробки в структурі сталі подрібнюються зерна і карбіди, підвищується ступінь легуваності мартенситу, реалізується фазовий наклеп, що загалом

підвищує ударну в'язкість, міцність, теплостійкість швидкорізальної сталі і, як наслідок, експлуатаційну стійкість ($K_w=1,2...2,0$) деревообробного інструменту. Однак цей спосіб термообробки швидкорізальної сталі недостатньо високо підвищує стійкість інструменту для різання важкооброблюваних сплавів, який зазнає великих механічних і теплових навантажень.

В основу винаходу покладено завдання створення нового способу зміцнення, який за допомогою термоциклічної термообробки швидкорізальної сталі та відпуску, більш повно подрібнив би зерна і карбіди, збільшив би кількість зносостійких карбідів MeC і ступінь легованості мартенситу карбідоутворювальними елементами, зменшив би вміст залишкового аустеніту, створив би мозаїчно-дискретну і функціонально-градієнтну структури, внаслідок чого підвищилися б в'язкість, міцність, твердість, теплостійкість і в подальшому зросла експлуатаційна стійкість металорізального інструменту.

Сутність технології полягає в тому, що в новому способі термічної обробки швидкорізальної сталі, що включає термоциклювання в інтервалі між температурою початку мартенситних перетворень і температурою плавлення сталі, гартування, нагрівання під яке поєднують з останнім нагріванням під час термоциклювання до температур, що перевищують температуру поліморфного перетворення, і багаторазовий відпуск, згідно з даною технологією час термоциклічного нагріву в усіх циклах, окрім останнього нагріву під гартування, варіюють у межах 10-110% від загального часу при стандартному гартуванні, а при гартуванні нагріту сталь спочатку поміщають у піч-ванну, що має температуру 630...650°C, витримують там 0,5...1,5 хв і потім охолоджують у маслі. Пропонований спосіб поширюється на всі марки швидкорізальних сталей.

Вибір температурного інтервалу під час термоциклювання обумовлений тим, що в зазначеному інтервалі температур легко проходять фазові перетворення та інші зміни структури, що поліпшують властивості швидкорізальної сталі. Верхня температурна межа термоциклічного нагрівання обмежена температурою плавлення, оскільки вище цієї температури спостерігається оплавлення і значне зростання зерна, що веде до різкого зниження механічних властивостей швидкорізальної сталі незалежно від

кількості термоциклів. Нижня температурна межа термоциклічного охолодження обмежена температурою початку мартенситних перетворень, оскільки при багаторазовому охолодженні нижче цієї температури починаються мартенситні перетворення або інші зміни в структурі, що ведуть до зниження міцності та в'язкості, зокрема до утворення важковиправного браку під назвою "нафталіновий злам", до появи високих напружень і гартівних мікротріщин. Температура початку мартенситних перетворень у свою чергу залежить від температури нагріву під гартування, марки швидкорізальної сталі, швидкості її охолодження та інших факторів.

Вибір часу термоциклічного нагрівання в усіх циклах, крім останнього, обумовлений тим, що цей час варіюють у межах 0,1-1,1 τ₃ від часу нагрівання під час традиційного гартування, що призводить до неповної аустенізації сталі, створення в ній неоднорідної структури і фазового наклепу. У разі багаторазового повторення неповного нагрівання формується мозаїчно-дискретна та функціонально-градієнтна структури з дисперсними карбідами, а остаточне гартування на останньому циклі фіксує цей стан. Час неповного термоциклічного нагрівання тим менший, чим більше циклів і вища температура нагріву. Час термоциклічного охолодження вибирається для вирівнювання температури за перерізом.

При термоциклюванні можна використовувати будь-які нагрівальні пристрої: вакуумні печі, печі із захисною атмосферою, соляні печі-ванни. В останньому випадку при нагріванні вище за температуру поліморфного (евтектоїдного) перетворення рекомендується використовувати соляні ванни, добре розкислені відновниками: бурою, вугіллям, карбідами бору, кальцію, кремнію тощо.

Для поліпшення ріжучих властивостей швидкорізальної сталі на стадії гартування спочатку нагріту сталь поміщають у піч-ванну, що має температуру 630...650°C, витримують там 0,5...1,5 хв і потім охолоджують у маслі. За температури 630...650°C утворюються зносостійкі карбіди типу MeC, підвищується в'язкість і теплостійкість сталі, але перевищення часу витримки понад 1,5 хв веде до втрати цих властивостей. Щоб зберегти позитивні зміни

структури, сталь швидко охолоджують у маслі. При охолодженні у воді можуть утворитися тріщини.

Пропонований спосіб термообробки швидкорізальної сталі, переважно для металорізальних інструментів, здійснюють за наступною методикою. Інструмент зі швидкорізальної сталі, попередньо просушений в електропечі або біля печі-ванни, піддають термоциклюванню шляхом послідовного перенесення його із соляних ванн для нагрівання в соляні ванни для охолодження. Після охолодження інструмент повертають у ті самі ванни для нагрівання і знову повторюють процес. Температуру ванн для термоциклічного нагрівання й охолодження варіюють в інтервалі температур між температурою плавлення і температурою початку мартенситних перетворень. Час термоциклічного нагрівання, крім останнього циклу, становить $0,1...1,1$ від часу нагріву при традиційному гартуванні. Останній нагрів при термоциклюванні поєднують із нагріванням під гартування шляхом перенесення з ванни для термоциклічного охолодження у ванну для нагріву під гартування. Причому температуру останнього термоциклічного нагрівання призначають відповідно до загальноприйнятих норм: 1270°C для сталі P18 (18%W), $1215...1225^{\circ}\text{C}$ – для сталей P6M5 (6%W, 5%Mo) і P9M4K8 (9%W, 4%Mo, 8%Co), ін. Нагріту до температури гартування сталь гартують шляхом її перенесення спочатку в соляну ванну з температурою $630...650^{\circ}\text{C}$, де витримують $0,5...1,5$ хв і охолоджують у маслі. Загартований таким способом інструмент піддають 2- або 3-кратному відпуску за $550...570^{\circ}\text{C}$ протягом $1...2$ годин залежно від його розмірів і марки сталі.

Для здійснення термоциклювання сталі шляхом багаторазового нагрівання і охолодження використовують розплави хлористих солей стандартного складу: при температурах вище 950°C – ванну на основі BaCl_2 , в інтервалі $800...950^{\circ}\text{C}$ – ванну на основі NaCl , при температурах в інтервалі $515...800^{\circ}\text{C}$ – ванну на основі $30\% \text{BaCl}_2 + 20\% \text{NaCl} + 50\% \text{CaCl}_2$. Вище температури 950°C соляні ванни добре розкислюють бурою, вугіллям, карбідами бору, кальцію, кремнію тощо. Для термоциклічного охолодження в інтервалі $250...540^{\circ}\text{C}$ використовують ванну, що складається з $50\% \text{KOH} + 50\% \text{NaOH}$, в інтервалі $160...280^{\circ}\text{C}$ – ванну, що

складається з 80% КОН+20% NaОН, нижче 160°C – підігріте машинне масло. Кількість соляних ванн залежить від температур термоциклічного нагрівання та охолодження, а також від рівня автоматизації процесу термообробки.

Експлуатаційну стійкість інструменту оцінювали за результатами випробувань мітчиків М6×1, виготовлених зі сталі Р9М4К8МП, шляхом нарізування різьби 5Н6Н у гайках із жароміцного нікелевого сплаву ЕІ437Б із твердістю НВ 300...350. Нарізування різьблення здійснювали на різьбонарізному верстаті Г813-5026 за таких режимів обробки: V=5 м/хв, S - ручна з самозатягуванням, МОР - масло МР-7. Показник стійкості визначали, як усереднене значення після випробувань 3...5 мітчиків, термічно оброблених за одним режимом. Результати порівняльних випробувань інструменту наведено в табл. 3.1 [1, 2, 9].

Таблиця 3.1 – Вплив термоциклічної термічної обробки на стійкість мітчика під час різання важкооброблюваного жароміцного сплаву

Термоциклювання, поєднане з нагрівом під гартування					Гартівне охолодження		Кількість гайок нарізаних мітчиком	Підвищення стійкості мітчика K _w
Температура термоциклічного нагрівання (крім останнього), °C	Температура термоциклічного охолодження (крім останнього), °C	Відношення часу термоциклічного нагріву до часу нагріву під гартування	Температура нагріву під гартування (останнього циклу), °C	Загальна кількість циклів	Температура ізотермічної витримки, °C	Час ізотермічної витримки, хв.		
Прототип								
1220	1110	1	1220	3	560	1	54	1
Запропонована термічна обробка								
1220	1110	0,5	1220	3	640	2,5	22	0,4
1220	1110	1,2	1220	3	650	1,5	49	0,9
1220	710	0,7	1220	3	660	0,3	43	0,8
1220	1110	0,3	1220	3	620	1,5	50	0,9
1305	790	0,1	1220	4	640	1	61	1,1
1220	130	0,7	1220	3	650	0,5	65	1,2
1150	790	1,1	1220	3	650	1	82	1,5
1220	710	0,6	1220	3	650	1	145	2,7
1220	710	0,7	1220	3	650	0,5	130	2,4
1220	900	0,5	1220	3	630	1,5	102	1,9
1220	710	1	1220	3	640	1	113	2,1

З наведених даних випливає, що використання запропонованого способу термічної обробки різального інструменту зі швидкорізальної сталі дає змогу, порівняно з прототипом, підвищити стійкість мітчика під час різання важкооброблюваного жароміцного сплаву в 1,1...2,7 рази.

Отже, для підвищення експлуатаційної стійкості інструменту, призначеного для різання важкооброблюваних сплавів, інструмент зі швидкорізальної сталі термоциклюють в інтервалі між температурою початку мартенситних перетворень і температурою плавлення, ступінчасто гартують від температури, що перевищує температуру поліморфного перетворення, нагрівання під яку суміщений з останнім нагріванням під час термоциклювання, і відпускають. Причому гартівне охолодження інструменту здійснюють у два етапи: спочатку охолоджують у соляній ванні, що має температуру 630-650°C, витримують там 0,5-1,5 хв, а потім охолоджують у маслі. У результаті термообробки швидкорізальної сталі відбувається більш повне подрібнення структури, збільшення кількості зносостійких карбідів типу MeC і ступеня легованості мартенситу, формування мозаїчно-дискретної та функціонально-дискретної мозаїчно-дискретної та функціонально-градієнтної структур, що підвищує працездатність інструменту при різанні важкооброблюваних сплавів.

3.2 Застосування кріогенної обробки для підвищення зносостійкості швидкорізальних сталей

Ключовим аспектом, що визначає залишковий вплив низьких температур на властивості металів (тобто після повернення до стандартних умов), є зміщення точки завершення мартенситного перетворення M_k нижче нуля для легованих та вуглецевих сталей. Зокрема, підвищений вміст вуглецю може бути наслідком поверхневої обробки деталей, наприклад, цементації. З ростом вмісту вуглецю понад 1% та введенням легувальних елементів знижується температура M_k (приблизно на 25...45 °C на кожен 1% легувальних елементів). Чим більше

вуглецю та легувальних елементів, тим вища температура гартування, тим більше залишкового аустеніту у загартованій сталі, а отже, нижча температура початку та завершення мартенситного перетворення. У деяких сталях остаточне перетворення аустеніту в мартенсит може відбуватися при температурах $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче, що вже відноситься до сфери кріогенних технологій. Дослідження властивостей металів у цій області потребують застосування спеціалізованого обладнання.

Незважаючи на широко прийняте розуміння процесів впливу низьких температур на структуру та властивості металів у науковій спільноті, існують розбіжності та невизначеності у деяких питаннях, як теоретичного, так і практичного характеру, що стримують широке впровадження кріогенних технологій у металургійну та машинобудівну галузі. Відсутність кінетичних діаграм станів металів у діапазоні низьких температур ускладнює розробку режимів кріогенної обробки інструментальних марок сталі. У зв'язку з цим, вивчення фазового складу металів у кріогенному температурному діапазоні стає необхідністю сучасного наукового дослідження.

У сфері машинобудування відбувається зміна акцентів на користь композитних різальних інструментів, до складу яких входять карбіди екзотичних металів (титан, тантал, вольфрам) у матриці лігатурного металу (нікель, молібден, кобальт). За даними експертів, на сьогодні частка таких матеріалів (ВК, ТН, КНТ типу) сягає 70 %. Поліпшення довговічності цих інструментів за допомогою кріогенної обробки досягається завдяки вдосконаленню кристалічної структури і властивостей лігатурної матриці [13]. В дослідженні [14] експериментально доведено, що кріогенна обробка збільшує густину дислокацій у карбідній фазі твердих сплавів, що веде до зміни їх фізико-механічних та різальних властивостей, зокрема зменшення термо-ерс та коефіцієнта тертя, зростання коерцитивної сили та твердості. Зменшення коефіцієнта тертя на різучій кромці інструментів веде до нижчих різальних сил і зниження мікронерівностей поверхні при обробці. Незважаючи на значну частку композитних інструментів, свердла і циліндричні фрези малих діаметрів все ще виготовляються з традиційних марок інструментальних сталей.

Режими та схеми технічного обслуговування криогенної обробки варіюються у великих межах, що ускладнює їх практичне використання. Серед ключових невирішених питань у сфері криогенної металообробки виокремлюються:

1. Температурні режими, швидкість та періодичність охолодження. Існує відомий метод гартування з миттєвим охолодженням у рідкому азоті [15], що ґрунтується на скороченні часу обробки та витрат холодоагенту. Також існує багато режимів контрольованого охолодження (від 1 до 20 °C/хв.), які передбачають поступове зниження температури металу. Останнім часом почали використовувати циклічні методи криогенної обробки [16]. Зменшення вмісту аустеніту у структурі зазвичай знижує ударну в'язкість сталі та підвищує схильність до відколів на ріжучих кромках інструментів. Проте будь-який варіант криогенної обробки спостерігається підвищення стійкості різних видів інструментів та марок сталей, що свідчить про домінуючу роль внутрішніх напружень, які мають бути зняті шляхом низького відпуску. Оцінка внутрішніх напружень здійснюється на основі методів скінченно-елементного моделювання [17].

2. Тривалість витримки при низьких температурах. Існує необхідність розрізняти холодну обробку (до -50...-70 °C) та криогенну обробку (до -196 °C). Згідно з теоретичними положеннями, після досягнення точки завершення мартенситного перетворення, перехід аустеніту в мартенсит має відбуватися достатньо швидко, і подальше зниження температури не повинно впливати на структуру. Проте, згідно з дослідженнями різних науковців, більш тривала витримка сталі (до 48 годин) при температурах нижчих за точку M_k сприяє підвищенню ефекту криогенної обробки. Встановлено [18], що існує оптимальний час тримання (близько 36 годин), перевищення якого знижує ефективність криогенної обробки через ріст карбідів. Під час криогенної обробки сталі 60ПП в інтервалі від 15 до 60 хвилин вміст мартенситу зростає на 5%, а мікротвердість - на 37%.

3. Охолодження за допомогою рідкого чи газоподібного холодоагенту. В літературі переважає думка про необхідність уникнення контакту оброблюваних

металевих зразків з рідким азотом під час охолодження та витримки, однак підтримання кріогенної температури газоподібним азотом вимагає значно більшого споживання холодоагенту. Визначено, що оптимальне споживання складає приблизно 1 л рідкого азоту на 1 кг металу за весь цикл обробки.

4. Найбільш "ефективні" марки сталей. Високовуглецеві та леговані марки сталей, а також вироби з цементованими поверхневими шарами (зубчасті колеса), є найкращими для кріогенної обробки. Деякі дослідники, працюючи зі стандартними марками інструментальних сталей (P18, P9, P6M5, 9XC), не завжди фіксували відчутне покращення властивостей або навіть відсутність ефекту залежно від попередньої термообробки. Втім, загальний аналіз свідчить про користь кріогенної обробки.

5. Комбіновані методи термічної та кріогенної обробок. Застосування кріообробки в комбінації з традиційними методами термічної обробки, такими як гартування та відпуск, сприяє суттєвому поліпшенню механічних властивостей швидкорізальних сталей. Аустеніт, який не зазнав стабілізуючого відпуску, більш чутливий до ефектів низьких температур. Температурна точка, на якій розпочинається мартенситне перетворення (M_n), визначає припустимий часовий проміжок між високотемпературним гартуванням та початком охолодження. З підвищенням M_n (вище нуля), час між цими процесами повинен скорочуватися, тобто кріогенна обробка має бути інтегрована у загальну схему термічної обробки. Це є прийнятним лише для підприємств, що виробляють інструменти, тоді як інші схеми можливі у ремонтних майстернях, де використовуються ріжучі інструменти. В дослідженні [19] обробку здійснювали через 1...2 дні після виготовлення, через 2...3 місяці, а також після тривалого (1...5 років) зберігання інструменту на складі. Отже, покращення властивостей можливе незалежно від часу, що минув після гарту.

Аналіз показав перспективність кріогенної обробки металів, але також виявив багато невизначеностей щодо режимів цієї обробки та відсутність в Україні серійно виготовлених зразків камер з обробки металів в діапазоні кріогенних температур.

Базуючись на проведених раніше дослідженнях, можна виділити основні напрямки досліджень у галузі кріогенної обробки металів:

- 1) Покращення абразивної стійкості ріжучого інструменту та деталей.
- 2) Підвищення твердості та довговічності (зменшення відламів) ріжучого краю.
- 3) Зниження мікротріщин у внутрішньому об'ємі деталей через нерівномірність нагріву.
- 4) Підвищення корозійної стійкості сталей.

На відміну від звичайних методів зміцнення поверхні (цементация, азотування, напilenня), низькотемпературна обробка впливає на весь об'єм металу (залежно від тривалості охолодження) і залишається активною протягом усього строку служби. Іншими словами, міцність, наприклад, зубців муфт, не залежить від їхнього контактного зношення, який може досягати 2...3 мм та більше. Ножі гільйотинних ножиць або валики можуть бути знову заточені багато разів, зберігаючи властивості, набуті після охолодження.

Механізми впливу низьких температур на механічні властивості металів і сплавів включають наступне:

- перетворення залишкового аустеніту в мартенсит і підвищення твердості сталі;
- утворення дрібних карбідів як фактора підвищення міцності та стійкості до зношення;
- гомогенізація структури та зменшення внутрішніх дефектів – ініціаторів тріщин;
- зняття внутрішніх напружень у металі після високотемпературного гартування.

Регульована швидкість охолодження і витримка за кріогенних температур вимагають подальшого низького відпуску до +180 °C, який усуває внутрішнє напруження, що виникають завдяки відмінності коефіцієнтів температурного розширення аустеніту і мартенситу, що особливо важливо для сталей з великою вихідною кількістю залишкового аустеніту. Тому застосовувані кріогенні установки (cryogenic processors) повинні забезпечувати циклічно повторювані

режими охолодження і нагрівання, що скорочує загальний час обробки. Така установка зображена на рис. 3.1.



1 – кріогенна камера з вакуумною теплоізоляцією; 2 – контейнер для завантаження зразків, поєднаний з нагрівальним елементом; 3 – підсилювач потужності ; 4 – цифровий контролер, що реалізує програмне управління режимами охолодження та нагріву; 5 – трубопровід з вакуумною теплоізоляцією; 6 – сифон з електричним випаровувачем, що забезпечує подавання рідкого азоту під тиском із 7 – посудини Дюара.

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд кріогенної установки

Установка розрахована на повний цикл кріогенної обробки протягом 24...48 год з подачею рідкого азоту зі змінних посудин Дюара (16 л), але може бути адаптована під будь-яку іншу посудину більшої ємності. Передбачено два режими роботи: охолодження і нагрівання зразків із заданою швидкістю, тобто можливість реалізації в одній установці циклічних режимів з переходом від глибокого холоду в область позитивних температур низького відпуску. Мінімальна швидкість зміни температури становить $1\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$, що забезпечує

відсутність внутрішніх напружень у масивних виробах складної геометричної форми. На даний момент установка може обробляти до 20 кг зразків, що становить близько 100 ріжучих інструментів середнього розміру. Завантаження-вивантаження зразків і зміна посудин Дюара з азотом виконується вручну. Розміри контейнера і маса завантажуваних зразків можуть бути збільшені під час встановлення додаткових кріплень всередині камери.

Першу пробну кріогенну обробку виконано одночасно на зразках з декількох різних марок швидкорізальних сталей: P18 (різці), P6M5 (фрези). Інструменти пройшли попередню стандартну ТО (див. рис. 1.6). Режим додаткової кріогенної обробки і низького відпуску був однаковим для всіх зразків. Графік зміни температури за циклами ТО наведено на рисунку 3.2. Загальний час обробки становив 26 год, витримка за температури рідкого азоту становила 18 год. Швидкість охолодження $1\text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$, швидкість нагріву $2\text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$

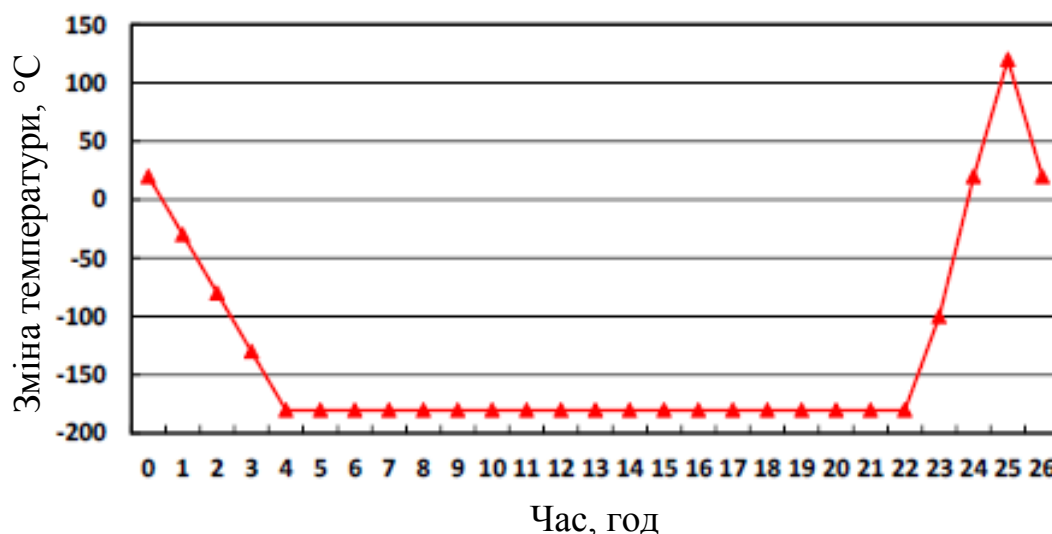


Рисунок 3.2 – Режим кріогенної обробки та низького відпуску зразків

Дослідження включали випробування на абразивне зношування і мікроструктурний аналіз інструментів: циліндричних фрез діаметром 8 мм зі сталі P6M5. Методики випробування різних інструментів вимагають врахування специфіки роботи кожного їх виду. За міжнародним стандартом ISO-3685 зношення визначається вимірюванням під мікроскопом змін геометричних розмірів крайок, включно з аналізом мікроскопів. У цьому дослідженні

застосовано спрощену методику, яка відрізняється від стандартних методів випробувань інструментів безпосередньо на верстатах. Це зумовлено тим, що під час обробки деталей складніше забезпечити однакові умови роботи інструментів за навантаженням, температурою нагріву, мастилом та іншими факторами.

Результати випробувань на зношення фрез зі сталі Р6М5 для стандартного (базового) режиму ТО і після додаткової кріогенної обробки наведені на малюнку 3.3 у вигляді графіків зміни маси зразків. Менша втрата маси зразка після кріогенної обробки відповідає більш високій зносостійкості інструментів порівняно з базовим режимом. Різниця в зношенні становить у середньому близько 26 %. Після 10 хв. випробувань було помітно більш інтенсивне зношування стандартного зразка фрези, в той час як зношення дослідного зразка має меншу залежність від часу роботи. Можна очікувати, що за більш тривалого періоду експлуатації інструментів відсотковий виграш за зносостійкістю збільшуватиметься.

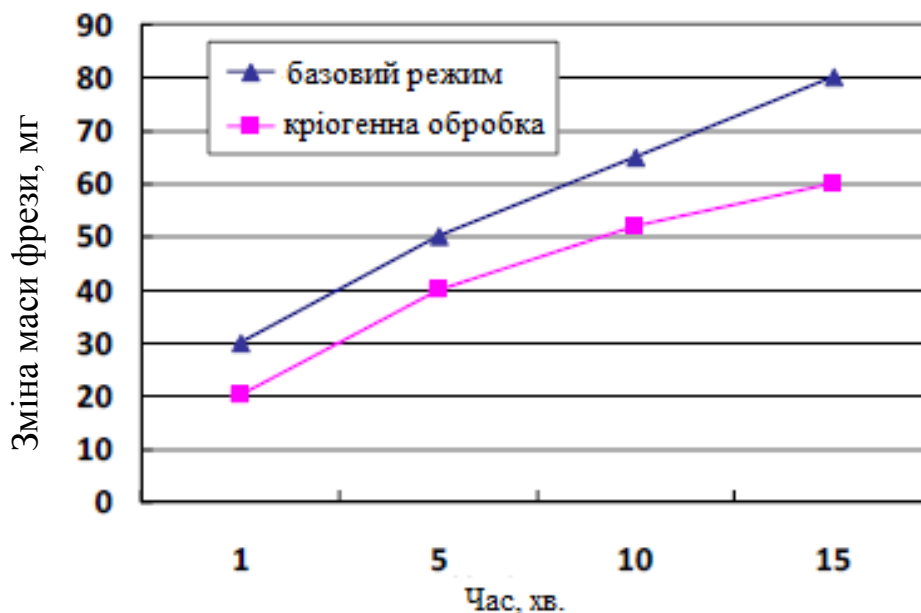
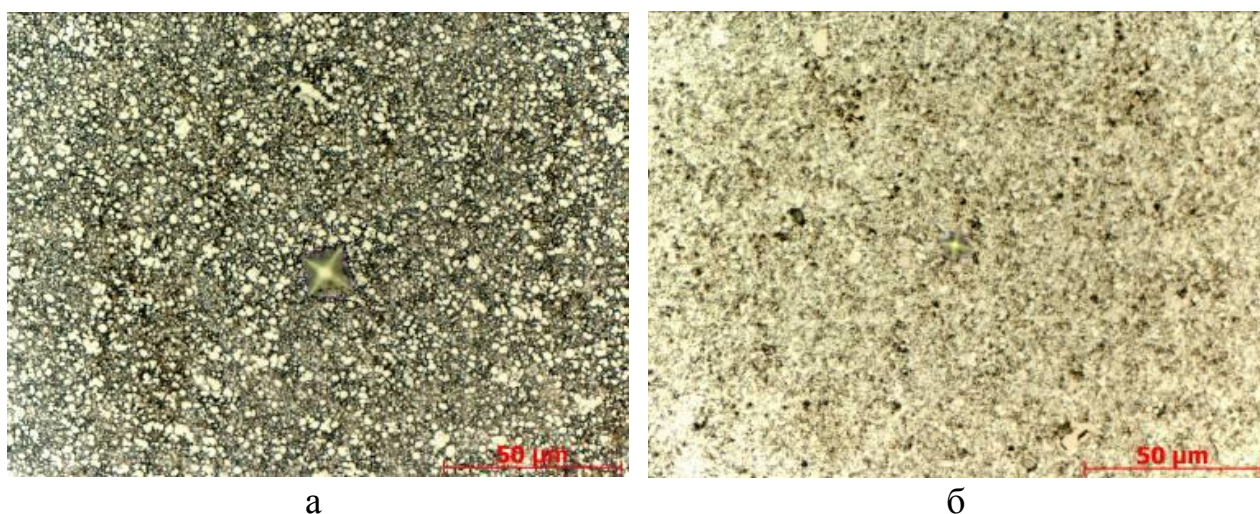


Рисунок 3.3 – Зміна маси зразків фрез зі сталі Р6М5 під час випробувань на зношення

На малюнку 3.4 представлено мікроструктури зразків фрез з уколами від приладу ПМТ-3, за якими чітко видно, що довжина діагоналі від тестового уколу в зразку після кріогенної обробки (рис. 3.4, б) менша, ніж у зразку, отриманому

за базовим режимом (рис. 3.4, а). Мікротвердість сталі Р6М5 збільшилася з 320 одиниць на зразку за базовим режимом до 864 одиниць для дослідного зразка, тобто на 170 %. Після криогенної обробки помітно зменшення кількості залишкового аустеніту (світлих ділянок) у структурі сталі Р6М5 і збільшення кількості темнотравленої структурної складової евтектоїдного типу. У сталі Р6М5 значне на 170 % зростання мікротвердості відповідає підвищенню зносостійкості тільки на 26 %.



а – базовий режим; б – режим з криогенною обробкою

Рисунок 3.4 – Мікроструктура зразків фрез із сталі Р6М5

Базовий (заводський) режим ТО інструментів зі сталі Р6М5 охоплює ступінчасте нагрівання до $+1220^{\circ}\text{C}$, гартування в маслі, триразовий високий відпуск при $+560^{\circ}\text{C}$ для усунення залишкового аустеніту і заключний низький відпуск при $+120^{\circ}\text{C}$ для зняття внутрішніх напружень. Передбачається надалі включити криогенну обробку в схему ТО після високотемпературного гартування і потім виконувати тільки низький відпуск протягом 1 год. Тим самим виключити три енергоємні операції високого відпуску, але отримати при цьому структуру з мінімальним вмістом аустеніту.

Отже, розроблена криогенна установка задовольняє потребам машинобудівних підприємств і ремонтних цехів під час виконання

безперервного кріогенного оброблення середніх за обсягом партій ріжучих інструментів (до 100 шт.). Цифровий контролер з достатньою точністю підтримує програмне охолодження до -196°C і нагрівання до $+180^{\circ}\text{C}$, забезпечуючи при цьому малу витрату рідкого азоту (1 л на 1 кг оброблюваного металу). Витрати ресурсів і часу на кріогенну обробку незрівнянно малі порівняно з багаторазовими високими відпусками за стандартними схемами ТО. Ще більшого скорочення витрат можна досягти за рахунок циклічності самої кріогенної обробки. Такий режим планується випробувати надалі.

Виконано пробну обробку партії зразків різних марок легованих сталей, включно з виробами з інструментальних і підшипникової сталей. Аналіз структури і властивостей зразків показав, що відбувається зміна структури оброблених сталей і на 25...65 % підвищується зносостійкість інструменту.

Зміни мікротвердості інструментальних сталей після кріогенної обробки не корелюються зі зносостійкістю зразків. Для сталі Р6М5 упорядкування мікроструктури і випадання дрібних карбідів превалює, як механізм підвищення експлуатаційних властивостей інструментів. Найбільший ефект буде досягатися, якщо кріогенну обробку включатимуть до загальної схеми ТО так, щоб не допускати стабілізації аустеніту після високотемпературного гартування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці є фундаментальним аспектом усіх виробничих процесів, особливо при термічній обробці швидкорізальних сталей, де високі температури та різні хімічні процеси створюють потенційні ризики для здоров'я та безпеки працівників. Передбачення та мінімізація професійних ризиків під час удосконалення режимів термічного оброблення є важливою частиною дослідження, спрямованої на збільшення міцності швидкорізальних сталей. У цьому розділі дипломної роботи будуть розглянуті основні заходи безпеки, включаючи використання захисного спорядження, вентиляції та правильне облаштування робочого місця. Аналіз потенційно небезпечних ситуацій та розробка ефективних процедур реагування на надзвичайні ситуації є критично важливими для забезпечення безпечного проведення експериментів. Забезпечення безпечних умов праці не тільки сприяє здоров'ю працівників, але й підвищує загальну продуктивність та ефективність технологічних процесів.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог

НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме [20]:

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати, нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності

енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

в) небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань;

г) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до термічної обробки що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

д) небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії з використанням електронних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань;

е) незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

є) невідповідність вимогам освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

з) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [21].

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680...800мм, а ширина і глибина –забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина – 800...1000мм).Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) до основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

- робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;

- заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;

- захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

в) об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блимання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому

місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

г) для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

д) об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках слід спочатку відключити високу напругу, піч диф.насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачання постаратися обмотати мокрими ганчірками піч диф. насоса і включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не почне падати. після

охолодження приступити до усунення несправності. При прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками [22-24].

4.3 Заходи з виробничої санітарії

а) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.
- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;
- в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;

– в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

– в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 %⁴⁵ при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

б) Виробниче освітлення організується і нормується залежно від:

- розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);
- виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

- природне (бокове або верхнє);
- штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове [25-27].

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до категорії виробництва з пожежної безпеки, визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель, блок управління і індикації та програмне забезпечення.

Панель системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів,

перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникненні з включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та/або проникненні на блоці індикації;
- включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;
- передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

- інфрачервоні, що реагують на рух;
- магнітоконтатні, що реагують на розмикання дверей;
- акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації [28, 29].

4.5 Заходи безпеки в умовах НС

Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов'язано із значними затратами, а по-друге, все ж неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв'язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об'єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об'єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсіпки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і т. д.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з'ємними і створюють запаси для заміни пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для

важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомodelей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфофрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах, які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з підвищеною ступенем стійкості до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел

електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерелах, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові скважини (артезіанські скважини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини сіті.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Сіті зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузол

заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв'язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв'язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогнебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об'єктів. Таке розосередження вибухових та вогнебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготовляти склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об'єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об'єктів, розташованих в низинних ділянках місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідропоруд.

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг) [30, 31].

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

В умовах постійного технологічного прогресу і розвитку промисловості, питання збільшення міцності та довговічності швидкорізальних сталей стає ключовим у вирішенні завдань сучасного виробництва. Процес термічного оброблення є однією з визначальних складових у формуванні властивостей цих матеріалів, і вдосконалення його режимів є перспективним напрямком досліджень.

Однією з головних цілей цього дослідження є досягнення оптимального балансу між міцністю і витратою енергії в процесі термічного оброблення швидкорізальних сталей. Застосування новітніх методів керування температурним режимом, часом нагріву та охолодження дозволяє досягти більш точного контролю над мікроструктурою матеріалу, підвищуючи при цьому його міцність та стійкість.

Додатковим аспектом є урахування впливу термічного оброблення на стійкість до зношування та втоми швидкорізальних сталей. Використання передових методів аналізу структури дозволяє виявити оптимальні параметри термічної обробки для досягнення максимальних показників працездатності інструментів при різанні матеріалів різної складності.

Отже, дослідження та удосконалення режимів термічного оброблення є важливим етапом в розвитку високоефективних та стійких до зношування швидкорізальних сталей, що визначає їхню конкурентоспроможність на ринку інструментів та виробів машинобудівної галузі.

5.2 Послідовний аналіз

Виконаний аналіз напрямків застосування та вигоди для споживачів (табл. 5.1). Надано цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів. Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Розробка вдосконаленої технології термічного оброблення з використанням криогенних температур для підвищення механічних властивостей швидкорізальних сталей.	1.Інструментальне виробництво. 2.Авіаційна промисловість. 3. Медичне обладнання.	1. Підвищення довговічності різального інструменту. 2. Збільшення міцності деталей літаків. 3. Поліпшення якості хірургічних інструментів.

Виконано аналіз попередньої характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	ПАТ "Інструментальний комбінат", Sandvik Coromant (Швеція), Kennametal (США)
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільне зростання попиту на високоякісну сталь.
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі вимоги до технологічної експертизи, значні капіталовкладення.
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO 9001, ASTM A681 (США), ДСТУ ISO 4957 (Україна).

Вивчено та визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтований перелік вимог до товару для кожної групи (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)
Вимога до покращення міцності та зносостійкості інструментальних матеріалів.	Виробники інструментального обладнання, авіабудівні компанії, медичні установи.	Промислові споживачі шукають надійність, медицина – стерильність.	Висока якість продукції, довговічність, відповідність міжнародним стандартам безпеки та якості.

Виконаний аналіз SWOT- аналіз середовища реалізації інноваційного проекту. Результати аналізу приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
1. Підвищення термічної стійкості сталей. 2. Зменшення зношення інструменту. 3. Збільшення продуктивності обладнання. 4. Екологічність процесу. 5. Патентування технології.	1. Високі початкові інвестиції. 2. Складність впровадження на існуючих виробництвах. 3. Потреба в кваліфікованих фахівцях.
Можливості:	Загрози:
1. Розширення ринку через високу якість продукції. 2. Співпраця з науковими установами. 3. Державні субсидії на інноваційні проекти.	1. Зміна ринкових умов. 2. Зростання конкуренції. 3. Поява нових технологічних рішень конкурентами. 4. Залежність від постачальників кріогенного обладнання.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Великі промислові підприємства	Висока	1000 од./рік	Висока	Складна
Малі та середні виробничі компанії	Помірна	500 од./рік	Середня	Легша
Дослідницькі лабораторії	Інтерес у дослідницьких установах.	200 од./рік	Низька	Сприятлива

Була проведена ідентифікація осіб, які мають інтерес до проекту, їх ранжування за пріоритетом та створена Карта стейкхолдерів. Ця карта призначена для візуалізації взаємодії між різними стейкхолдерами. Для цього на карті виділено три концентричні зони, де представлені всі особи, які мають інтерес до інноваційного проекту. Кожна з цих зон показує рівень впливу ініціатора проекту на зацікавлених осіб. Внутрішня зона відображає повноваження та відповідальність ініціатора. Особи з цієї зони є безпосередньо підпорядковані ініціатору, що дозволяє застосовувати прості методи управління проектом (див. рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Карта стейкхолдерів

5.3 Техніко-економічні розрахунки

Мета даного розділу полягає в обґрунтуванні доцільності використання технології термічної обробки для швидкорізальних сталей. У таблиці 5.6 подані техніко-економічні дані, які детально висвітлюють характеристики виробів, включаючи якісні параметри, вартість виробництва, термін служби та інші ключові аспекти. Ці дані є основою для аргументації ефективності впровадження технології термічної обробки, що може позитивно впливати на якість та тривалість експлуатації різального інструменту, а також економічні показники виробництва.

Враховуючи техніко-економічні дані в таблиці 5.6, можна визначити позитивний вплив використання технології термічної обробки на деякі ключові

показники продукції. Наприклад, підвищення міцності та стійкості до зношування різального інструменту може призвести до збільшення їх терміну служби, що в свою чергу може зменшити витрати на ремонт та заміну.

Застосування технології термічної обробки може також вплинути на економічні параметри виробництва, такі як витрати на енергію та витрати на виробництво. Детальне вивчення та аналіз цих даних дозволяє зробити висновок про доцільність та ефективність впровадження даної технології для покращення якості та конкурентоспроможності продукції фрез зі сталі P6M5.

Таблиця 5.6 – Техніко-економічні показники виробів

Показник	Базова технологія	Нова технологія
1. Фреза	Сталь P6M5	Сталь P6M5
2. Технологія зміцнення	Гартування 1220 °С, триразовий високотемпературний відпуск 550 °С	Гартування 1220 °С, обробка холодом -180°С та подальший низький відпуск при 150°С
3. Програма випуску, т	40	40

Вартість сировини і основних матеріалів розраховується на основі технічно обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховуються транспортно-заготівельні витрати. Сума витрат на сировину та матеріали зменшується на величину зворотних відходів, які створюються в процесі виробництва. Вартість сировини та основних матеріалів наведена в таблиці 5.7

Таблиця 5.7 – Вартість основних матеріалів при термічній обробці

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма використання	Ціна	Вартість, грн
Базова технологія			
1. Мінеральна олія (веретенна)	20 кг/т	13000 грн/т	260
2. Розчин солі $BaCl_2$	90 кг/т	13800 грн/т	1242
Разом			1502
Нова технологія			
1. Мінеральна олія (веретенна)	20 кг/т	13000 грн/т	260
2. Розчин солі $BaCl_2$	30 кг/т	13800 грн/т	414
3. Рідкий азот	90 л/т	50 грн/л	4500
Разом			5174

Основна заробітна плата основних виробничих робітників на одиницю виробу розраховується на основі трудомісткості виготовлення та часових тарифних ставок.

Розрахунок основної заробітної плати на одиницю продукції наведений в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка)

Найменування операції	Норма часу, п-годин	Розряд робіт	Часова тарифна ставка, грн	Заробітна плата на одиницю продукції (розцінка), грн.
Базова технологія				
Гартування	3	4	45	135
Триразовий високотемпературний відпуск	10	3	39	390
Разом				525
Нова технологія				
Гартування	3	4	45	135
Обробка холодом	10	3	39	390
Низькотемпературний відпуск	0,5	3	39	20
Разом				545

Додаткова заробітна плата виробничих робітників виплачується за кількість та якість виконаної роботи.

Вона вміщує надбавки і доплати, премії за виробничі результати, оплату чергових та додаткових відпусток та інше. Додаткова заробітна плата складає 40% від основної, та розраховується за формулою:

$$ЗД = ЗО \cdot \frac{K_D}{100} = 525 \times \frac{40}{100} = 210 \text{ грн} \quad \text{— для базової технології}$$

$$ЗД = ЗО \cdot \frac{K_D}{100} = 545 \times \frac{40}{100} = 218 \text{ грн} \quad \text{— для нової технології}$$

де K_d – процент додаткової заробітної плати.

Відрахування на соціальні заходи являють собою форму перерозподілу доходу на фінансування суспільних потреб, розраховуються згідно діючого законодавства і складають 22% від фонду оплати праці. Премії з прибутку становлять 50% від основної заробітної платні .

Відрахування на соціальні заходи розраховуються за формулою:

$$BC = (ZO + ЗД + ПП) \cdot \frac{K_{\text{вс}}}{100} = (525 + 210 + 263) \times \frac{22}{100} = 219,56 \text{ грн} \text{ — для}$$

базової технології

$$BC = (ZO + ЗД + ПП) \cdot \frac{K_{\text{вс}}}{100} = (545 + 218 + 273) \times \frac{22}{100} = 228 \text{ грн} \text{ — для нової}$$

технології

де ПП – премії з прибутку, грн;

$K_{\text{вс}}$ – % відрахування на соціальні заходи.

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників і спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

Загальновиробничі витрати складають в середньому 400% до основної заробітної плати та розраховуються за формулою:

$$ЗВВ = ЗО \cdot \frac{\alpha}{100} = 525 \times \frac{400}{100} = 2100 \text{ грн} \text{ — для базової технології}$$

$$ЗВВ = ЗО \cdot \frac{\alpha}{100} = 545 \times \frac{400}{100} = 2180 \text{ грн} \text{ — для нової технології}$$

де α – % загально виробничих витрат.

Вищенаведені витрати складають виробничу собівартість.

Адміністративні витрати вміщують витрати, пов'язані з утриманням адміністративно - управлінського персоналу підприємства, а також утриманням та експлуатацією основних засобів загального виробничого призначення, охорону праці та техніку безпеки персоналу та інші. Адміністративні витрати складають в середньому 400% від основної заробітної плати основних виробничих робітників та розраховуються за формулою:

$$AB = ЗО \cdot \frac{\beta}{100} = 525 \times \frac{400}{100} = 2100 \text{ грн} \text{ — для базової технології}$$

$$AB = ЗО \cdot \frac{\beta}{100} = 545 \times \frac{400}{100} = 2180 \text{ грн} \text{ — для нової технології}$$

де β – % адміністративних витрат.

Витрати на збут складаються з витрат, пов'язаних з реалізацією продукції і вміщують витрати на тару та тарні матеріали, транспортування готової продукції, рекламу, витрати на маркетингові дослідження та інші. Витрати на збут складають 2% від виробничої собівартості і розраховуються за формулою:

$$ВЗ = C_{\epsilon} \cdot \frac{\gamma}{100} = 6657 \times \frac{2}{100} = 133,14 \text{ грн} \text{ — для базової технології}$$

$$ВЗ = C_{\epsilon} \cdot \frac{\gamma}{100} = 10525 \times \frac{2}{100} = 210,5 \text{ грн} \text{ — для нової технології}$$

де C_v – собівартість виробнича, грн;

γ – % витрат на збут.

Калькуляція собівартості та визначення ціни термічної обробки, представлені в таблиці 5.9, становлять ключовий етап у формуванні економічної стратегії виробництва. Аналіз цих показників дозволяє зрозуміти витрати на різні етапи технологічного процесу, від сировини до готового продукту, і враховувати фактори, такі як енергетичні витрати, трудові затрати, амортизація обладнання та інші витрати, що впливають на собівартість.

Зазначена таблиця також є важливим інструментом для визначення оптимальної цінової політики на внутрішньому та зовнішньому ринках. Додатковий аналіз ціноутворення допомагає враховувати конкурентоспроможність продукції на ринку, реагуючи на зміни витрат та попиту на термічну обробку, і визначає стратегію позиціонування виробника на ринку послуг термічної обробки.

Таблиця 5.9 – Калькуляція собівартості і ціни термічної обробки

Статті витрат	Сума, грн (для базової технології)	Сума, грн (для нової технології)
1	2	3
1. Матеріали на термічну обробку	1502	5174
2. Основна заробітна плата основних виробничих робітників	525	545
3. Додаткова заробітна плата виробничих робітників	210	218
4. Відрахування на соціальні заходи	219,56	228
5. Загальновиробничі витрати	2100	2180

Кінець таблиці 5.9

6. Адміністративні витрати	2100	2180
7. Собівартість виробнича	6657	10525
8. Витрати на збут	133,14	210,5

Економічний ефект від впровадження нової технології термообробки розраховується за формулою:

$$E = C_{\text{б}} \times K - C_{\text{н}} = (6657 \times 1,7) - 10525 = 791,9 \text{ грн}$$

де $C_{\text{б}}$ – собівартість базової технології;

$C_{\text{н}}$ – собівартість нової технології;

K – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу = 1,7.

Таким чином, за рахунок використання нової технології термічної обробки вдалося збільшити експлуатаційний ресурс фрез у 1,7 рази в порівнянні із базовою технологією. Це пояснюється тим, що коефіцієнт експлуатаційного ресурсу залежить від міцності та стійкості, яка в свою чергу залежить від кількості аустеніту залишкового. Для зменшення його кількості в новій технології застосовують обробку холодом. Внаслідок покращення механічних властивостей швидкорізальної сталі Р6М5 шляхом вдосконалення технології термічної обробки було отримано економічний ефект 791,9 грн на 1 т продукції.

ВИСНОВКИ

Для підвищення експлуатаційної стійкості інструменту, призначеного для різання важкооброблюваних сплавів, інструмент зі швидкорізальної сталі термоциклюють в інтервалі між температурою початку мартенситних перетворень і температурою плавлення, ступінчасто гартують від температури, що перевищує температуру поліморфного перетворення, нагрівання під яку суміщений з останнім нагріванням під час термоциклювання, і відпускають. Причому гартівне охолодження інструменту здійснюють у два етапи: спочатку охолоджують у соляній ванні, що має температуру 630-650°C, витримують там 0,5-1,5 хв, а потім охолоджують у маслі. У результаті термообробки швидкорізальної сталі відбувається більш повне подрібнення структури, збільшення кількості зносостійких карбідів типу MeC і ступеня легуваності мартенситу, формування мозаїчно-дискретної та функціонально-дискретної мозаїчно-дискретної та функціонально-градієнтної структур, що підвищує працездатність інструменту при різанні важкооброблюваних сплавів.

Розроблена кріогенна установка задовольняє потребам машинобудівних підприємств і ремонтних цехів під час виконання безперервного кріогенного оброблення середніх за обсягом партій ріжучих інструментів (до 100 шт.). Цифровий контролер з достатньою точністю підтримує програмне охолодження до -196 °C і нагрівання до +180 °C, забезпечуючи при цьому малу витрату рідкого азоту (1 л на 1 кг оброблюваного металу). Витрати ресурсів і часу на кріогенну обробку незрівнянно малі порівняно з багаторазовими високими відпусками за стандартними схемами ТО. Ще більшого скорочення витрат можна досягти за рахунок циклічності самої кріогенної обробки. Такий режим планується випробувати надалі.

Виконано пробну обробку партії зразків різних марок інструментальних сталей. Аналіз структури і властивостей зразків показав, що відбувається зміна структури оброблених сталей і на 25...65 % підвищується зносостійкість інструменту.

Зміни мікротвердості інструментальних сталей після кріогенної обробки не корелюються зі зносостійкістю зразків. Для сталі Р6М5 упорядкування мікроструктури і випадання дрібних карбідів превалює, як механізм підвищення експлуатаційних властивостей інструментів. Найбільший ефект буде досягатися, якщо кріогенну обробку включатимуть до загальної схеми ТО так, щоб не допускати стабілізації аустеніту після високотемпературного гартування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Мойсеенко О.И. Инструментальные материалы / О.И. Мойсеенко, О.И. Чкалова – Киев: Вища школа, 1983. – 192 с.
2. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. М.: Металлургия. – 1985. – 408 с.
3. A 600 – 92a. Tool Steel High Speed [Electronic resource]. – Effective from 2004-01-01. – Official edition. – [S. l. : s. n.], 2004. – 7 p. – Mode of access: DOI: 10.1520/A0600-92AR16 (date of access: 25.10.2023). – Title from screen.
4. ДСТУ EN ISO 4957:2007. Сталі інструментальні. Технічні умови. – Чинний від 2009-01-01. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 32 с.
5. Supura S. Defects in the Heat Treatment of Steel. Metals. Industries. Metallurgy [Electronic resource] // Engineering Notes. – Mode of access: <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/heat-treatment/defects-in-the-heat-treatment-of-steel-metals-industries-metallurgy/20834> (date of access: 02.11.2023). — Title from screen.
6. Shizhong Wei. Research on wear resistance of high-speed steel with high vanadium content / Wei Shizhong, Zhu Jinhua, Xu Leujue // Materials Science and Engineering. – 2005. – P.138-145. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.05.062>
7. Euh K. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance of VC/steel surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation / K. Euh, S. Lee. // Metall Mater Trans A. – 2003. – Vol. 34. – P. 59-69. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0208-8>
8. Shizhong Wei. Effects of vanadium and carbon on microstructures and abrasive wear resistance of high-speed steel / Wei Shizhong, Zhu Jinhua, Xu Leujue //

Tribology International. – 2006. – Vol.9. – P. 641-648.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.035>

9. Мовчан О.В. Вплив морфології евтектичної складової в швидкорізальній сталі на її зносостійкість / О.В. Мовчан, К.О. Чорноіваненко // Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід: матеріали V Міжнародної конф., [Дніпро], 29 лист. 2022р. / Інститут промислових та бізнес-технологій УДУНТ. – Дніпро, 2022. – С. 188-191.

10. Галико А.В. Деякі принципи раціонального легування і термічної обробки швидкоріжучих сталей / А.В. Галико // Наукові записки КНТУ. – 2011. – 11 (І). – С.88-89.

11. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT) [Текст]. Прийнято та надано чинності 2022-12-28. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 75 с.

12. Конспект лекцій з дисципліни «Методи структурного аналізу матеріалів» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» денної і заочної форм навчання / Укл. О.А. Глотка, Л.П. Степанова. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 90 с.

13. Yong A.Y.L., Seah K.H.W., Rahman M. Performance Evaluation of Cryogenically Treated Tungsten Carbide Tools in Turning // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Issue 46. – P. 2051-2056.

14. Theja M. Bala, Rao G. Prabhakara, Reddy K. Hemachandra. Effects of cryogenic treatment on tool steel AISI-D6 // European Chemical Bulletin. – 2023. – 07 (01). – Pp. 52-56. DOI:10.53555/ecb.2018.7.52-56

15. А.с. 485161 СССР, МПК C21D6/04, C21D1/56, C21D9/22. Способ термической обработки инструмента / Жмудь Е.С. – 1839057/22; заявл. 27.10.1972; опубл. 25.09.1975, Бюл. №35. – 3 с.

16. Alava L.A. Multistage cryogenic treatment of materials: process fundamentals and examples of application / Proc. of the 10th Int. Conference

"Cryogenics 2008", Praha, Czech Republic, April 21-25, 2008. – P. 223-230. ICARIS.
<http://www.icaris.cz/en/126-conferences-congresses-we%20ve-organized.html>

17. FEM simulation and experimental verification of temperature field and phase transformation in deep cryogenic treatment / Li J.-W., Tang L.-L., et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2012. – Issue 2. - P. 2421-2430.

18. Amini K., Akhbarizadeh A., Javadpour S. Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment // Vacuum. – 2012. – Issue 86. – P. 1534-1540.

19. Hong S.Y., Markus I., Jeong W.-C. New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V / International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2001. – Issue 41. – P. 2245-2260.

20. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

21. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р. – К.: ВР України, 1998. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. – (Закон України).

22. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [Текст] : ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України).

23. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – 59 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

24. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.15-18. – На заміну

НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18. – К. : Мінсоцполітики України, 2018. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

25. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин [Електронний ресурс] : ДСанПіН 3.3.2.007-98. – Чинний від 1998-12-10. – К. : МОЗ України, 1998. – URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. – (Державні санітарні правила та норми).

26. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. – (Державні санітарні норми).

27. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України).

28. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки).

29. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір [Текст] : ДСТУ ISO 6309:2007. – На заміну ГОСТ 12.4.026-76 в частині пунктів 1.1, 1.2, 1.4, 1.6 таблиці 5, пунктів 2.1, 2.2 таблиці 6, пунктів 4.1-4.11 таблиці 8; знаків 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 2.1, 2.2, 4.1-4.11 додатка 3 ; чинний від 2007-10-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с. – (Державний Стандарт України).

30. Планування і забудова територій [Текст] : ДБН Б.2.2-12:2018 – На заміну ДБН 360-92** ; ДБН Б.2.4-1-94 ; ДБН Б.2.4-3-95 ; ДБН Б.2.4-4-97 ; ДБН Б.1-2-95 ; СНиП II-89-80 ; чинний від 2018-09-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 179 с. – (Державні будівельні норми).

31. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум [Текст] : навчальний посібник / Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Піскун – 2-ге вид., стер. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 496 с.

ДОДАТОК А