

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності**

Кафедра матеріалознавства

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

**Автоматизація контролю температури печі
гартування з використанням ПЛК SIMATIC S7 /
Automation of tempering furnace temperature control
using SIMATIC S7 PLC**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Індустріальний інжиніринг і
менеджмент»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)сз-31

ФОРМАЗЮК Олег Ігорович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Фещук Юрій Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“___” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____

керівник роботи _____,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ року № _____

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«___» _____ 202__ р.

3. Вихідні дані до роботи _____

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

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «___» _____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка

Здобувач вищої освіти _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

ФОРМАЗЮК Олег Ігорович. Автоматизація контролю температури печі гартування з використанням ПЛК SIMATIC S7. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Індустріальний інжиніринг і менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

У роботі розглянуто питання підвищення ефективності термічної обробки валів циркуляційних пил шляхом автоматизації контролю температури печі гартування із застосуванням програмованого логічного контролера SIMATIC S7.

Проведено аналіз умов експлуатації вала циркуляційної пили та встановлено основні фактори, що визначають його довговічність, міцність і зносостійкість. Виконано порівняльний аналіз конструкційних сталей C45E (1.1191) та 41Cr4 (1.7035).

Проведено оцінку впливу точності підтримання температури в печі на результати гартування та поліпшення сталей.

Розроблено систему автоматичного контролю температури печі гартування на базі ПЛК SIMATIC S7.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка містить 59 сторінок формату A4, 27 рисунків, 9 таблиць та 11 літературних джерела. Графічна частина містить 8 листів формату A4 у додатку Д.

Ключові слова: термічна обробка, гартування, поліпшення, вал циркуляційної пили, сталь 41Cr4, C45E, мартенсит, відпущений мартенсит, автоматизація, SIMATIC S7, ПЛК, контроль температури.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Формазюк				Автоматизація контролю температури печі гартування з використанням ПЛК SIMATIC S7	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Фещук						3	59
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІМ)сз-31		
Н. Контр.	Мисковець							
Затв.	Імдірович							

ANNOTATION

Loshak Oleksandr Mykolaiovych. Improvement of heat treatment technology for bevel gear reducer. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP " Industrial Engineering and Management" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The paper considers the issue of increasing the efficiency of heat treatment of circular saw shafts by automating the temperature control of the hardening furnace using the SIMATIC S7 programmable logic controller.

The operating conditions of the circular saw shaft were analyzed and the main factors determining its durability, strength and wear resistance were established. A comparative analysis of structural steels C45E (1.1191) and 41Cr4 (1.7035) was performed.

The impact of the accuracy of maintaining the temperature in the furnace on the results of hardening and improving steels was assessed.

A system for automatic temperature control of the hardening furnace based on the SIMATIC S7 PLC was developed.

The bachelor's qualification work consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note contains 59 pages of A4 format, 27 figures, 9 tables and 11 literary sources. The graphic part contains 8 sheets of A4 format in Appendix D.

Keywords: heat treatment, hardening, improvement, circular saw shaft, steel 41Cr4, C45E, martensite, tempered martensite, automation, SIMATIC S7, PLC, temperature control..

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	9
1.1. Термічна обробка сталей у сучасному машинобудуванні	9
1.2. Конструкційні сталі для виготовлення валів та їх порівняльний аналіз	12
1.3. Вибір матеріалу валу циркуляційної пили	15
1.4. Сучасні печі для гартування металевих виробів.....	15
1.4.1. Камерні печі.....	16
1.4.2. Шахтні печі	17
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	25
2.1. Характеристика об'єкта дослідження.....	25
2.1.1. Вал циркуляційної пили	25
2.2. Методика металографічних досліджень	29
2.3. Методика визначення фізико-механічних властивостей	29
2.4. Порівняльне дослідження фізико-механічних властивостей сталей С45Е та 41Cr4 після різних режимів термічної обробки	30
2.5. Результати металографічних досліджень	34
2.6. Аналіз методів автоматичного регулювання температури та обґрунтування вибору PID-регулятора для шахтної печі гартування	38
2.6.1. Двопозиційне регулювання.....	38
2.6.2. Трипозиційне регулювання.....	39
2.6.3. Пропорційне регулювання (Р-регулятор).....	39
2.6.4. Пропорційно-інтегральне регулювання (PI-регулятор).....	39
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	44
3.2 Регулювання температури за допомогою ПІД-регулятора.....	50
3.3 Укладання технологічного процесу термічної обробки вала циркуляційної пили.....	53
РОЗДІЛ 4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	54

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58
ДОДАТКИ	

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування, транспортної галузі та металообробного виробництва нерозривно пов'язаний із підвищенням вимог до якості, надійності та довговічності деталей машин. Одним із найбільш ефективних способів забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей металевих виробів є термічна обробка, яка дозволяє цілеспрямовано змінювати структуру матеріалу та формувати необхідний рівень міцності, твердості, пластичності та зносостійкості. Особливе місце серед видів термічної обробки займає гартування, яке широко використовується під час виготовлення валів, зубчастих коліс, ріжучого інструменту та інших відповідальних деталей машин.

Процес гартування становить особливий інтерес, оскільки саме температурні режими нагрівання, витримки та охолодження визначають перебіг фазових перетворень у сталі, формування мартенситної структури та кінцеві експлуатаційні характеристики виробу. Навіть незначне відхилення температури від заданого режиму може призвести до неповної аустенізації, перегріву металу, утворення грубозернистої структури або зниження механічних властивостей готової деталі. Саме тому забезпечення високої точності підтримання температури в печах гартування є одним із найважливіших завдань сучасного термічного виробництва.

Традиційні системи керування термічними печами часто характеризуються недостатньою точністю регулювання, складністю налаштування та обмеженими можливостями моніторингу технологічних параметрів. Водночас розвиток цифрових технологій та концепції Індустрії 4.0 сприяє широкому впровадженню програмованих логічних контролерів, систем диспетчеризації та інтелектуальних засобів автоматизації. Одними з найбільш поширених технічних рішень у промисловості є програмовані логічні контролери сімейства SIMATIC S7

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компанії Siemens, які забезпечують високу надійність роботи, гнучкість програмування та можливість інтеграції з сучасними системами керування виробництвом.

Використання ПЛК SIMATIC S7 для автоматичного контролю температури печі гартування дозволяє реалізувати точне підтримання заданого температурного режиму, безперервний моніторинг технологічного процесу, архівування даних та оперативне реагування на можливі відхилення. Це сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу, покращенню якості термічно оброблених виробів та зниженню енергетичних витрат виробництва.

У даній роботі об'єктом дослідження є процес гартування вала циркуляційної пили, виготовленого зі сталі 41Cr4 (1.7035), яка за своїми властивостями є європейським аналогом широко застосовуваної сталі 40X. Вибір даного матеріалу обумовлений його значним поширенням у машинобудуванні, доброю прогартовуваністю та здатністю формувати високі механічні властивості після термічної обробки. Особлива увага приділяється дослідженню впливу температурного режиму гартування на формування структури та твердості матеріалу, а також розробленню автоматизованої системи контролю температури печі.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Термічна обробка сталей у сучасному машинобудуванні

Розвиток сучасного машинобудування нерозривно пов'язаний із постійним підвищенням вимог до надійності, довговічності та експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів. Умови роботи більшості відповідальних деталей характеризуються дією значних механічних навантажень, циклічних напружень, тертя, ударних впливів та агресивних факторів навколишнього середовища. За таких умов забезпечення необхідного рівня міцності та зносостійкості виробів стає одним із ключових завдань сучасного виробництва. Вирішення цього завдання неможливе без застосування ефективних методів формування структури металів і сплавів, серед яких особливе місце займає термічна обробка.

Термічна обробка є одним із найважливіших технологічних процесів у матеріалознавстві, що дозволяє цілеспрямовано змінювати структуру металів шляхом нагрівання, витримки та охолодження за певними режимами. На відміну від механічної обробки або легування, термічна обробка дає можливість суттєво змінювати властивості матеріалу без зміни його хімічного складу. Саме тому вона широко використовується під час виготовлення валів, зубчастих коліс, шпинделів, ріжучого інструменту, підшипникових деталей та інших відповідальних елементів машин.

Особливу роль термічна обробка відіграє у виробництві виробів зі сталей, які залишаються основним конструкційним матеріалом сучасного машинобудування. Популярність сталей пояснюється поєднанням високих механічних властивостей, технологічності, відносно низької вартості та можливості широкого регулювання структури за допомогою термічної

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки. Завдяки зміні температурних режимів нагрівання та охолодження можна отримувати широкий спектр структурних станів – від пластичного феритно-перлітного до високоміцного мартенситного.

Серед численних видів термічної обробки найбільшого поширення в машинобудуванні набули відпалювання, нормалізація, гартування та відпуск. Кожен із цих процесів виконує певну функцію та застосовується залежно від вимог до готового виробу. Відпалювання використовують для зняття внутрішніх напружень і підвищення пластичності металу, нормалізацію – для формування дрібнозернистої структури та покращення оброблюваності різанням, тоді як гартування та відпуск спрямовані на отримання високих показників міцності, твердості та зносостійкості.

Особливе значення у виробництві деталей машин має процес гартування. Його сутність полягає у нагріванні сталі до температури утворення аустеніту, витримці при цій температурі та подальшому швидкому охолодженні. У результаті таких фазових перетворень аустеніт переходить у мартенсит – пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі, який характеризується високою твердістю та міцністю. Саме завдяки утворенню мартенситної структури забезпечуються необхідні експлуатаційні характеристики деталей, що працюють в умовах значних механічних навантажень.

Разом із тим процес гартування є одним із найбільш складних та відповідальних видів термічної обробки. Формування необхідної структури значною мірою залежить від точності дотримання температурних параметрів. Недостатня температура нагрівання може призвести до неповної аустенізації та зниження твердості після гартування. Перегрів металу викликає ріст зерна аустеніту, що негативно впливає на механічні властивості та в'язкість матеріалу. Надмірно інтенсивне охолодження може спричиняти появу внутрішніх напружень, деформацій і навіть утворення гартівних тріщин. Тому контроль температурного режиму є одним із головних чинників забезпечення якості термічної обробки.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для багатьох деталей машин особливо важливим є забезпечення оптимального співвідношення між твердістю та в'язкістю. Висока твердість необхідна для протидії зношуванню, тоді як достатня в'язкість дозволяє сприймати ударні навантаження без руйнування. Саме тому після гартування зазвичай проводять відпуск, у процесі якого частина внутрішніх напружень знімається, а структура мартенситу набуває більш стабільного стану. Комбінація гартування та відпуску дозволяє формувати комплекс механічних властивостей, необхідних для роботи відповідальних деталей машин.

Сучасні тенденції розвитку машинобудування висувають дедалі жорсткіші вимоги до якості термічної обробки. Поширення високопродуктивного обладнання, автоматизованих виробничих ліній та концепції Індустрії 4.0 вимагає забезпечення стабільності технологічних процесів та мінімізації впливу людського фактора. У зв'язку з цим особливого значення набувають автоматизовані системи контролю та керування температурними режимами термічних печей.

Впровадження сучасних систем автоматизації дозволяє підтримувати температуру з високою точністю, здійснювати безперервний моніторинг параметрів процесу, накопичувати технологічні дані та забезпечувати оперативне реагування на можливі відхилення. Використання програмованих логічних контролерів, цифрових датчиків температури та сучасних алгоритмів регулювання сприяє підвищенню якості продукції та зменшенню енергетичних витрат виробництва.

Для деталей типу валів циркуляційних пил, які працюють в умовах змінних навантажень, ударної дії та тертя, якість термічної обробки безпосередньо визначає їхню довговічність та надійність. Отримання рівномірної мартенситної структури по всьому об'єму виробу можливе лише за умови точного дотримання температурного режиму нагрівання та охолодження. Саме тому питання автоматизації контролю температури печей гартування є не лише актуальним завданням автоматизації виробництва, а й

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

важливою складовою сучасного матеріалознавства, спрямованою на забезпечення стабільного формування структури та властивостей конструкційних сталей.

Таким чином, термічна обробка залишається одним із найефективніших способів керування структурою та властивостями сталей у сучасному машинобудуванні. Подальше підвищення ефективності цього процесу нерозривно пов'язане із впровадженням автоматизованих систем контролю температури, що забезпечують високу якість продукції, стабільність технологічних режимів та конкурентоспроможність промислового виробництва.

1.2. Конструкційні сталі для виготовлення валів та їх порівняльний аналіз

Одним із найважливіших етапів проєктування та виготовлення деталей машин є правильний вибір конструкційного матеріалу. Від властивостей матеріалу значною мірою залежить довговічність виробу, його працездатність, стійкість до зношування та здатність сприймати експлуатаційні навантаження. Особливо високі вимоги висуваються до валів, які є одними з найбільш навантажених елементів механічних передач. У процесі роботи вони сприймають крутні моменти, згинальні навантаження, динамічні удари та циклічні напруження, що можуть призводити до втомного руйнування. Тому матеріал валів повинен поєднувати високу міцність, достатню пластичність, добру в'язкість та здатність до термічного зміцнення.

У сучасному машинобудуванні для виготовлення валів широко застосовуються середньовуглецеві конструкційні сталі, серед яких особливе місце займають сталі С45Е (1.1191) та 41Cr4 (1.7035). Обидві марки належать до групи сталей для поліпшення та широко використовуються для виготовлення валів редукторів, шпинделів, осей, зубчастих коліс та інших відповідальних деталей машин.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сталь С45Е є якісною нелегованою середньовуглецевою конструкційною сталлю. Вона характеризується добрим поєднанням міцності, технологічності та економічності. Її хімічний склад відповідно до стандарту EN 10083 наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі С45Е, %

C	Si	Mn	P	S
0,42...0,50	≤0,40	0,50...0,80	≤0,025	≤0,035

Основним зміцнювальним елементом у сталі є вуглець, вміст якого становить близько 0,45 %. Саме він забезпечує можливість формування мартенситної структури після гартування та досягнення високої твердості. Водночас відсутність легуючих елементів обмежує прогартовуваність сталі, тому вона ефективно використовується переважно для деталей невеликих та середніх розмірів.

Іншим широко поширеним матеріалом для виготовлення валів є сталь 41Cr4. Вона належить до групи легованих конструкційних сталей і характеризується підвищеною прогартовуваністю завдяки наявності хрому. Хімічний склад сталі наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сталі 41Cr4, %

C	Si	Mn	Cr	P	S
0,38...0,45	≤0,40	0,60...0,90	0,90...1,20	≤0,025	≤0,035

Наявність приблизно 1 % хрому суттєво покращує прогартовуваність сталі та забезпечує більш рівномірне формування мартенситної структури по всьому перерізу деталі. Крім того, хром сприяє підвищенню міцності, зносостійкості та опору втомному руйнуванню.

Механічні властивості сталей значною мірою залежать від режимів термічної обробки. Після поліпшення (гартування та високого відпуску) обидві сталі здатні забезпечувати високий рівень міцності, однак між ними існують певні відмінності.

Таблиця 1.3 – Механічні властивості сталей після поліпшення

Показник	Марка сталі	
	C45E	41Cr4
Межа міцності σ_B , МПа	700...850	850...1100
Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	450...600	700...900
Відносне подовження δ , %	12...16	10...14
Ударна в'язкість, Дж/см ²	40...60	50...80
Твердість після гартування, HRC	52...56	55...60

З наведених даних видно, що сталь 41Cr4 перевищує сталь C45E за показниками міцності, прокаліюваності та максимально досяжної твердості. Це пояснюється легуванням хромом, який уповільнює дифузійні перетворення під час охолодження та сприяє утворенню мартенситу навіть у деталях значного перерізу.

Окрім механічних характеристик, важливе значення мають технологічні властивості матеріалів. Для машинобудівних підприємств важливо забезпечити не лише необхідні експлуатаційні характеристики виробів, а й економічність їх виготовлення.

Сталь C45E характеризується доброю оброблюваністю різанням, високою доступністю на ринку та відносно низькою вартістю. Вона легко піддається токарній, фрезерній та свердлильній обробці, а також добре реагує на поверхневе зміцнення. Водночас її прогартовуваність є обмеженою, що може створювати труднощі під час термічної обробки валів великого діаметра.

Сталь 41Cr4 також має задовільну оброблюваність різанням, хоча через підвищену міцність після попередньої термічної обробки вона дещо складніша в механічній обробці. Разом із тим вона характеризується значно кращою прогартовуваністю та стабільністю властивостей після термічного зміцнення. Саме тому дана сталь широко застосовується для виготовлення відповідальних валів редукторів, шпинделів верстатів та інших деталей, що працюють під дією високих навантажень.

1.3. Вибір матеріалу валу циркуляційної пили

Суттєвим фактором під час вибору матеріалу є його вартість. Аналіз європейського ринку металопрокату свідчить, що вартість сталі 41Cr4 зазвичай на 15...30 % перевищує вартість сталі C45E. Основною причиною є використання легувального елемента – хрому, а також більш складна технологія виробництва. Однак додаткові витрати компенсуються підвищенням довговічності виробів та можливістю використання деталей у більш складних умовах експлуатації.

Для валів циркуляційних пил характерні значні циклічні навантаження, локальні концентрації напружень у місцях посадок під підшипники та кріпильні елементи, а також необхідність забезпечення високої зносостійкості робочих поверхонь. У таких умовах особливо важливо забезпечити рівномірне зміцнення всього перерізу деталі після термічної обробки. Саме тому сталь 41Cr4 має суттєві переваги порівняно зі сталлю C45E.

Проведений аналіз показує, що обидві сталі можуть використовуватися для виготовлення валів машинобудівного призначення. Проте сталь C45E доцільно застосовувати для менш навантажених деталей або за необхідності мінімізації виробничих витрат. Для відповідальних валів, що працюють в умовах підвищених навантажень та потребують гартування з отриманням високої твердості по всьому перерізу, раціональним є використання сталі 41Cr4.

Саме ця сталь обрана як матеріал дослідження, оскільки забезпечує оптимальне поєднання міцності, зносостійкості, технологічності та надійності під час експлуатації вала циркуляційної пили (рисунок 1, додаток А).

1.4. Сучасні печі для гартування металевих виробів

Якість термічної обробки значною мірою залежить від технічного рівня обладнання, на якому здійснюється нагрівання металу. Навіть за правильно

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні печі для гартування відрізняються конструкцією, способом завантаження виробів, типом нагрівання, продуктивністю та рівнем автоматизації. Найбільш поширеними в машинобудуванні є камерні, шахтні, конвеєрні та печі безперервної дії.

Камерні печі належать до найбільш універсального обладнання термічних цехів. Їх конструкція складається з теплоізованої камери, нагрівальних елементів, дверей та системи керування. Деталі завантажуються в піч партіями та піддаються нагріванню відповідно до заданого режиму.

Нагрівальні елементи

Робоча зона із деталями

Нагрівальні елементи
Двері

The diagram shows two cross-sectional views of a quenching furnace.
Through quench principle TQ (left): A red arrow indicates the workpiece enters from the left, and a green arrow indicates it exits to the right. The furnace has heating elements on top and a door at the bottom.
Return through quench principle RTQ (right): A red arrow indicates the workpiece enters from the left, and a green arrow indicates it exits to the right. This design includes a return path for the quenchant, with a separate chamber and a return arrow pointing back to the left.

а
б
в

а – схема будови камерної печі; б – прохідна камерна піч;
в – камерна піч зворотної дії за принципом гартування

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характер роботи, значні тепловтрати під час відкривання дверей та нерівномірність температурного поля при великих розмірах робочої камери.



Рисунок 1.2 – Камерної піч

Такі печі широко використовуються для гартування валів, зубчастих коліс, штампів та інших деталей середніх розмірів.

1.4.2. Шахтні печі

Шахтні печі мають вертикальне розташування робочого простору та призначені переважно для нагрівання довгомірних виробів, валів, осей та труб.

Схема шахтної печі наведена на рисунку 1.3, її зображення наведено на рисунку 1.4:

Завдяки вертикальному розташуванню забезпечується рівномірне нагрівання довгих виробів та мінімізується їх деформація під власною вагою. Такі печі часто використовуються при термічній обробці валів великої довжини, як у нашому випадку.

Основним недоліком є складність механізації процесів завантаження та вивантаження деталей.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

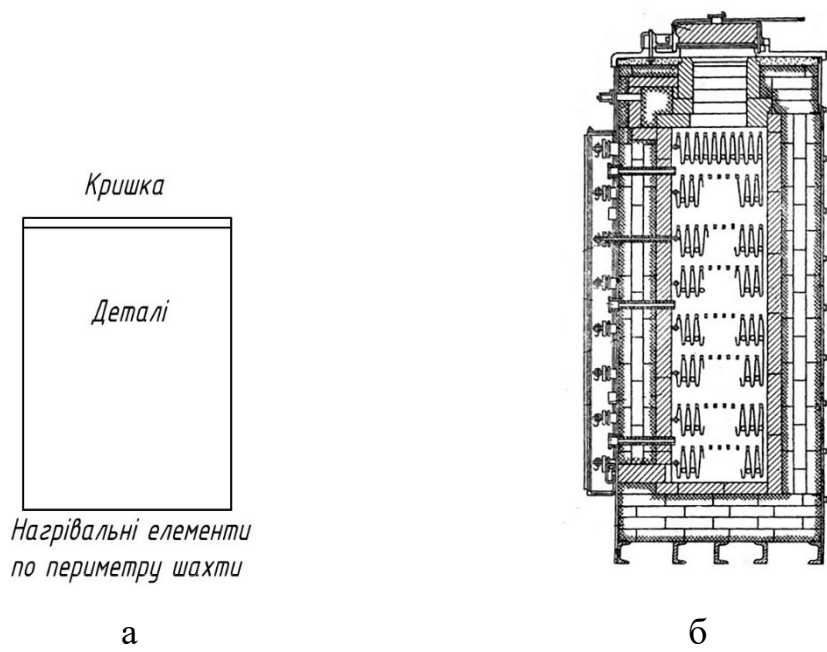


Рисунок 1.3 – Схема (а) та будова (б) шахтної печі:



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд шахтної пічі

1.4.3. Конвеєрні печі

Конвеєрні печі призначені для серійного та масового виробництва. Переміщення виробів через робочий простір здійснюється за допомогою конвеєрної стрічки або роликового транспортера (рисунки 1.5, 1.6).

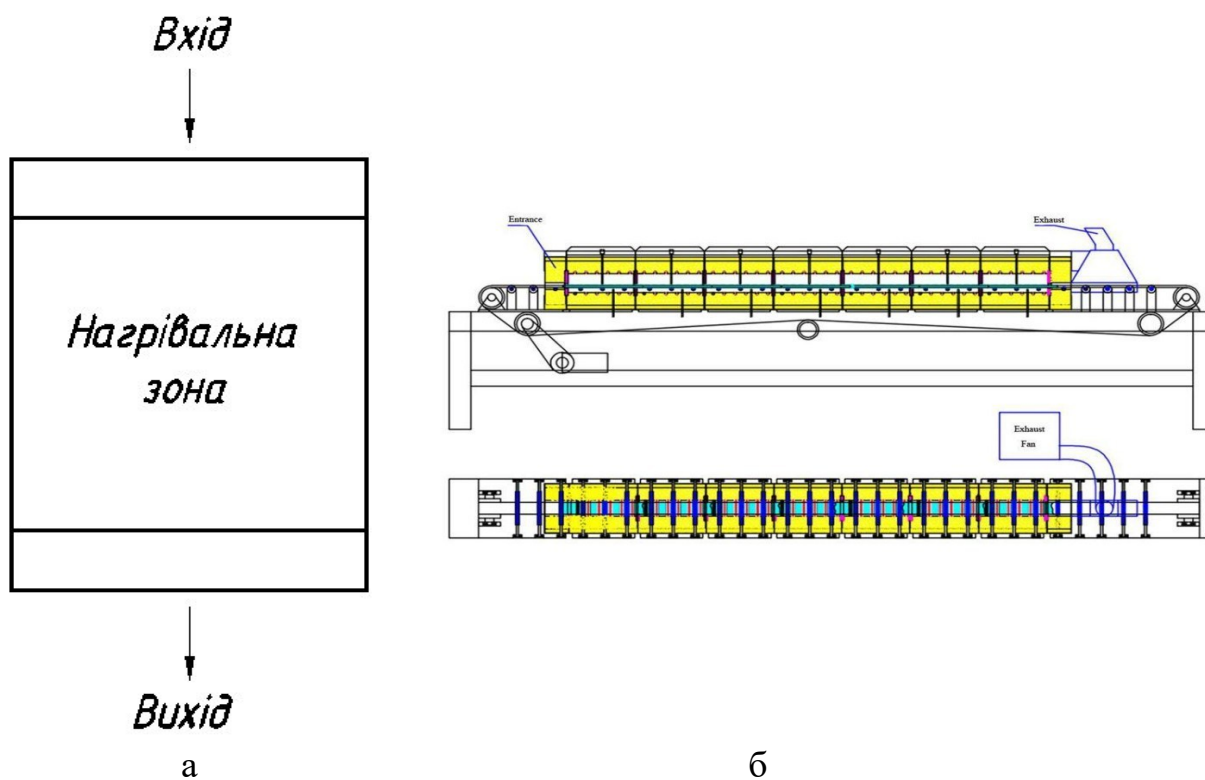


Рисунок 1.5 – Схема (а) та принцип роботи (б) конвеєрної печі



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд конвеєрної пічі

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними перевагами є висока продуктивність, можливість автоматизації та стабільність температурного режиму. Такі печі широко використовуються на автомобільних та машинобудівних підприємствах.

До недоліків належать висока вартість обладнання та обмеження щодо номенклатури деталей.

1.4.4. Печі безперервної дії

Печі безперервної дії забезпечують безперервний рух деталей через декілька температурних зон (рисунки 1.7, 1.8).

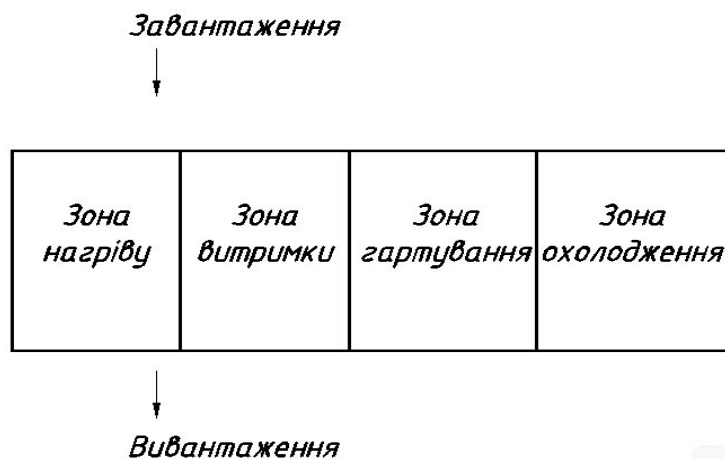


Рисунок 1.7 – Типова схема печі безперервної дії

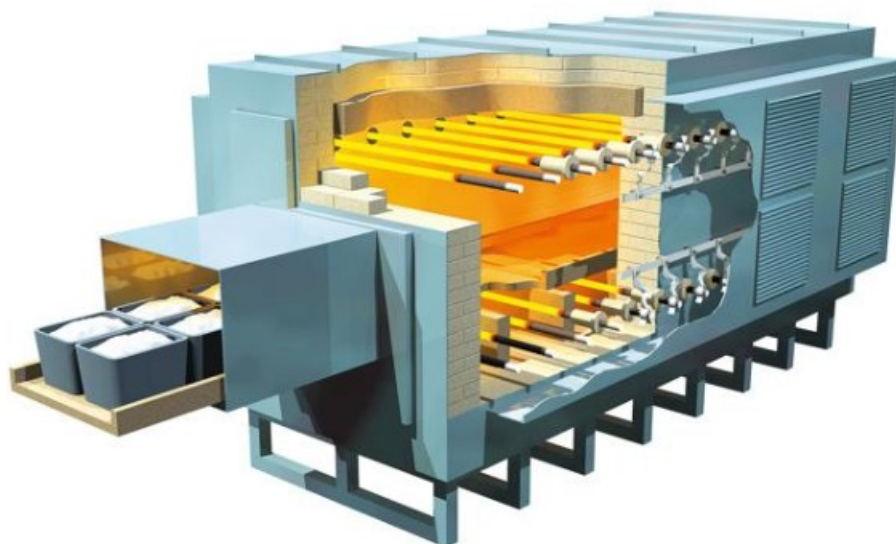


Рисунок 1.8 – Будова печі безперервної дії

Подібне обладнання характеризується високою продуктивністю, мінімальними тепловими втратами та високим ступенем автоматизації. Саме такі печі найбільш повно відповідають концепції Індустрії 4.0.

1.4.5. Сучасні системи контролю температури в термічних печах

Точність підтримання температури є одним із найважливіших показників ефективності термічної печі. У промисловості найчастіше використовуються такі засоби вимірювання температури:

- термопари типу К (до 1200 °С);
- термопари типу N;
- термопари типу S та R;
- термометри опору Pt100;
- інфрачервоні пірометри;
- тепловізійні системи контролю.

Типова схема існуючої системи контролю (рисунок 1.9):

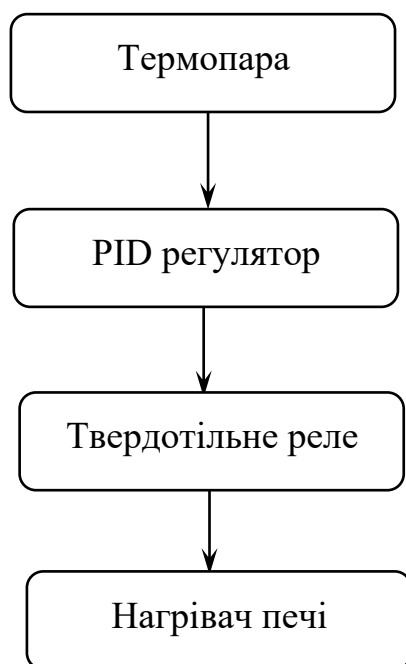


Рисунок 1.9 – Схема контролю температури

Подібні системи широко використовуються на багатьох підприємствах, проте мають ряд недоліків:

- контроль температури лише в одній точці;
- відсутність архівування даних;
- складність віддаленого моніторингу;
- неможливість інтеграції з виробничими мережами;
- обмежені можливості діагностики.

1.4.6. Перспективи вдосконалення систем контролю температури

Сучасним напрямом розвитку термічного обладнання є впровадження програмованих логічних контролерів та цифрових систем автоматизації. Найбільш ефективним рішенням для модернізації печей гартування є використання контролерів SIMATIC S7-1200 або SIMATIC S7-1500.

Удосконалена система контролю температури може мати таку структуру (рисунок 1.10):

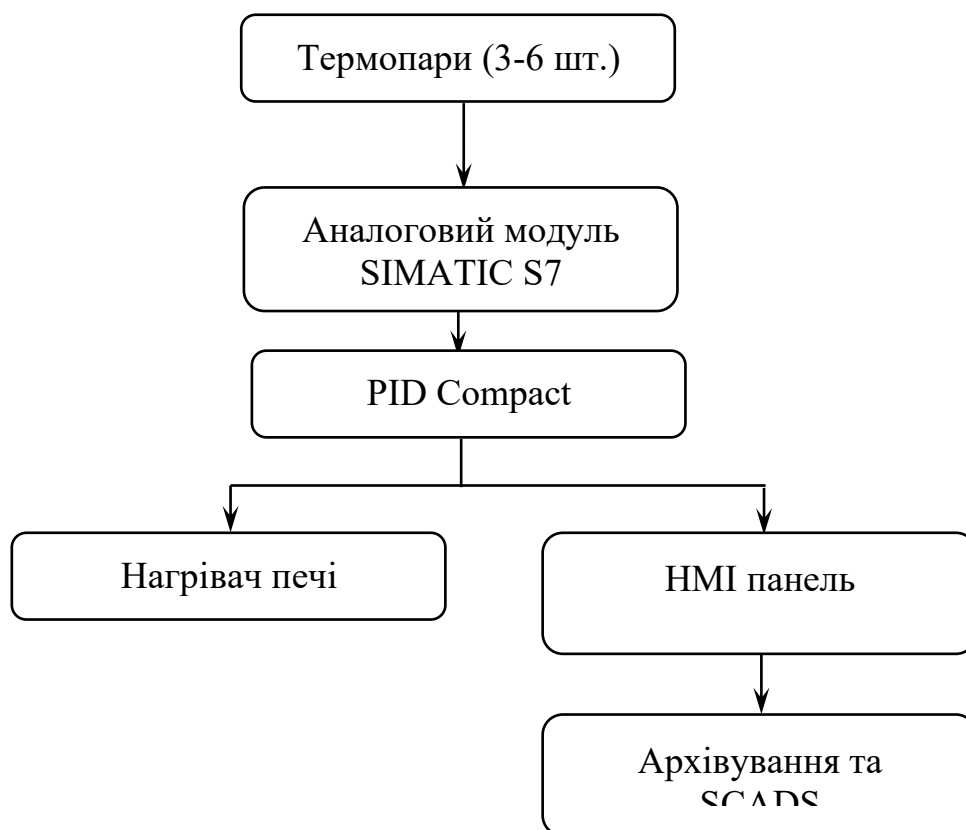


Рисунок 1.10 – Вдосконалена схема контролю температури

Використання ПЛК дозволяє:

- підтримувати температуру з точністю $\pm 1...2$ °C;
- контролювати температуру в декількох зонах печі;
- автоматично формувати графіки нагрівання;
- архівувати технологічні параметри;
- реалізувати віддалений моніторинг через Ethernet;
- знизити витрати електроенергії на 5...15 %;
- забезпечити повторюваність результатів термічної обробки.

Для валів зі сталі 41Cr4, які розглядаються у даній роботі, впровадження автоматизованої системи контролю температури дозволяє забезпечити стабільне формування мартенситної структури, зменшити розкид твердості та підвищити якість термічної обробки. Саме тому подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення системи автоматичного контролю температури печі гартування на базі контролера SIMATIC S7.

1.5. Мета роботи та основні завдання

Метою роботи є підвищення ефективності процесу гартування вала циркуляційної пили шляхом розроблення та впровадження автоматизованої системи контролю температури печі на базі програмованого логічного контролера SIMATIC S7.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- встановити умови роботи вала циркуляційної пили;
- провести порівняльний аналіз сталей C45E та 41Cr4 за хімічним складом, механічними властивостями, прокаліюваністю, технологічністю та вартістю та визначити найбільш раціональний матеріал для виготовлення досліджуваного вала;
- обґрунтувати режим термічної обробки вала зі сталі 41Cr4;

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- встановити вплив точності підтримання температури безпосередньо на процес аустенізації, формування мартенситу після гартування та структури відпущеного мартенситу після поліпшення;
- провести аналіз методів автоматичного регулювання температури та встановити оптимальний спосіб контролю температури;
- обрати PLC для контролю температури, архівування параметрів та автоматичного керування процесом нагрівання.
- встановити вплив точності підтримки температури на формування однорідної структури після гартування і поліпшення;
- запропонувати гартувальний бак та касету для подачі валів у гартувальний бак.

Об'єкт дослідження – процес термічної обробки валів циркуляційних пил зі сталі 41Cr4 у шахтній печі.

Предмет дослідження – вплив точності автоматизованого контролю температури шахтної печі на структурний стан та механічні властивості сталі 41Cr4 після гартування і поліпшення.

Актуальність роботи полягає у необхідності поєднання матеріалознавчих підходів до забезпечення якості термічної обробки із сучасними засобами автоматизації технологічних процесів. Розроблення ефективної системи контролю температури дозволяє забезпечити стабільність структуроутворення в сталі, підвищити відтворюваність результатів термічної обробки та зменшити вплив людського фактора на якість продукції.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи автоматичного контролю температури на підприємствах машинобудівної та металообробної галузей для підвищення якості термічної обробки виробів зі сталей типу 41Cr4 та інших конструкційних матеріалів. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані під час модернізації існуючих термічних дільниць та створення нових автоматизованих виробничих комплексів.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Характеристика об'єкта дослідження

2.1.1. Вал циркуляційної пили

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес термічної обробки валів циркуляційних пил зі сталі 41Cr4 у шахтній печі. Від технічного стану та механічних властивостей вала циркуляційної пили (рисунок 2.1) значною мірою залежить надійність роботи всієї установки, точність різання, продуктивність обладнання та безпека його експлуатації.



Рисунок 2.1 – Вал циркуляційної пили в зборі

Конструктивно вал являє собою ступінчасту деталь циліндричної форми, на якій передбачені посадкові поверхні для встановлення підшипників, шківів, а також вузол кріплення дискової пили. Залежно від конструкції обладнання на валу можуть бути виконані шпонкові пази, різьбові ділянки, проточки та інші елементи, що забезпечують монтаж деталей приводу та робочого інструмента.

В нашому випадку під шків виконано шпонковий паз. Параметри вала наведені в таблиці 2.1, ескіз вала наведена на рисунку А.1 додатку А.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1

Параметр	Прийняте значення
Загальна довжина вала	380 мм
Матеріал	41Cr4 / 1.7035
Посадка під пильний диск	Ø30 h6
Посадковий отвір пильного диска	Ø30 мм
Кріплення диска	два фланці + гайка
Різьба гайки	M24×1,5
Тип опор	UCP207
Діаметр посадок під підшипники	Ø35 мм
Відстань між центрами опор	360 мм
Орієнтовний діаметр пильного диска	300...400 мм
Рекомендована термообробка	гартування + високий відпуск
Орієнтовна твердість після ТО	45...50 HRC

Прийнята конструкція забезпечує можливість встановлення стандартного твердосплавного пильного диска з отвором Ø30 мм, достатню жорсткість вала та технологічність виготовлення. Використання сталі 41Cr4 дозволяє після гартування та високого відпуску отримати необхідне поєднання міцності, твердості та в'язкості, що є важливим для роботи вала в умовах циклічних і динамічних навантажень [7...10].

Під час роботи циркуляційної пили вал здійснює безперервне обертання з частотою, яка може досягати 1500...6000 об/хв залежно від призначення обладнання. При цьому він одночасно сприймає крутний момент від електродвигуна, згинальні навантаження від маси пильного диска та сил різання, а також динамічні навантаження, що виникають під час запуску, зупинки та зміни режимів роботи. Сукупність зазначених факторів висуває високі вимоги до міцності та довговічності матеріалу вала.

З точки зору матеріалознавства вал циркуляційної пили є деталлю, для якої особливо важливими є структура матеріалу та її стабільність у процесі

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатації. Наявність концентраторів напружень у вигляді шпонкових пазів, уступів та посадкових поверхонь створює умови для зародження втомних тріщин. Саме тому матеріал вала повинен характеризуватися високою межею витривалості, достатньою в'язкістю та здатністю протистояти циклічним навантаженням.

Умови експлуатації

Умови роботи валів циркуляційних пил належать до категорії складних та характеризуються комплексною дією механічних і динамічних навантажень. Під час обертання пильного диска на вал передаються значні крутні моменти, величина яких залежить від потужності приводу та режиму різання. Одночасно виникають згинальні навантаження, обумовлені власною масою диска та силами різання, що прикладаються до зубців пилки під час контакту з оброблюваним матеріалом.

Особливістю роботи циркуляційних пил є наявність змінних та ударних навантажень. Під час врзання зубців у матеріал виникають короточасні пікові зусилля, які можуть у декілька разів перевищувати середні робочі навантаження. Крім того, на вал впливають вібрації, спричинені дисбалансом обертових частин, нерівномірністю різання та можливими похибками монтажу.

Важливим фактором є також циклічний характер навантаження. Протягом усього терміну служби вал здійснює мільйони циклів навантаження та розвантаження, що створює передумови для розвитку втомних процесів у матеріалі. Саме втомне руйнування є однією з найпоширеніших причин виходу з ладу валів машин та механізмів.

Додатковими факторами, які впливають на працездатність вала, є локальний нагрів у місцях встановлення підшипників, контактне тертя посадкових поверхонь, а також можливий вплив агресивного виробничого середовища у вигляді пилу, вологи та продуктів корозії.

Зазначені умови експлуатації обумовлюють необхідність застосування конструкційних сталей із високими показниками міцності та зносостійкості, а

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також проведення термічної обробки для формування оптимальної структури матеріалу.

Вимоги до механічних властивостей

Враховуючи характер навантажень та умови експлуатації, до валів циркуляційних пил висувається комплекс вимог щодо механічних властивостей матеріалу.

Насамперед матеріал повинен мати високу межу міцності та межу текучості, що забезпечує сприйняття значних крутних і згинальних навантажень без виникнення пластичної деформації. Для валів машинобудівного призначення після термічного поліпшення доцільним є забезпечення межі міцності не менше 850 МПа та межі текучості понад 700 МПа.

Важливим показником є твердість поверхні. Підвищена твердість сприяє збільшенню зносостійкості посадкових поверхонь, зменшує інтенсивність абразивного зношування та забезпечує тривалий термін експлуатації виробу. Для валів зі сталі 41Cr4 після гартування та відпуску твердість зазвичай знаходиться в межах 45...55 HRC [6].

Поряд із високою твердістю матеріал повинен зберігати достатню ударну в'язкість. Недостатня в'язкість може призвести до крихкого руйнування деталі під дією ударних навантажень або концентраторів напружень. Тому термічна обробка повинна забезпечувати оптимальне співвідношення між міцністю та пластичністю матеріалу.

Особливого значення набуває межа витривалості, яка визначає здатність матеріалу протистояти втомному руйнуванню за умов багаторазового циклічного навантаження. Для валів циркуляційних пил цей показник є одним із головних критеріїв довговічності.

Для забезпечення зазначених властивостей доцільним є використання легованих конструкційних сталей, зокрема сталі 41Cr4 (1.7035), яка після гартування та відпуску формує дрібнодисперсну структуру відпущеного

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мартенситу. Така структура забезпечує високу міцність, підвищену зносостійкість та достатню в'язкість, що повністю відповідає умовам експлуатації валів циркуляційних пил.

Таким чином, аналіз конструкції вала циркуляційної пили, умов його роботи та вимог до механічних властивостей показує доцільність використання термічного зміцнення для забезпечення необхідного комплексу експлуатаційних характеристик. Вирішальним фактором якості термічної обробки є точність підтримання температурного режиму гартування, що обумовлює актуальність розроблення автоматизованої системи контролю температури печі на базі програмованого логічного контролера SIMATIC S7.

2.2. Методика металографічних досліджень

Металографічні дослідження виконували відповідно до ДСТУ EN ISO 643:2022 [4], а підготовку шліфів та травлення – за загальноприйнятими металографічними методиками для конструкційних сталей із використанням 4 %-го ніталю.

Металографічний аналіз проводиться для зразків, що піддавались термічній обробці в печах з точністю регулювання температури 10 °C та $\pm 1...2$ °C.

2.3. Методика визначення фізико-механічних властивостей

Визначення твердості за шкалою HRC проводили за ДСТУ ISO 6508-1:2013 [3]

Визначення межі міцності та межі текучості проводили за ДСТУ ISO 6892-1:2019 [1].

Визначення ударної в'язкості проводили за ДСТУ ISO 148-1:2022 [2].

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Порівняльне дослідження фізико-механічних властивостей сталей С45Е та 41Cr4 після різних режимів термічної обробки

Для обґрунтування доцільності автоматизації контролю температури печі гартування було прийнято порівняльне дослідження двох конструкційних сталей: С45Е (1.1191) та 41Cr4 (1.7035). Сталь С45Е є середньовуглецевою нелегованою конструкційною сталлю, а сталь 41Cr4 належить до легованих хромистих сталей для поліпшення (таблиці 2.2 та 2.3). Обидві сталі можуть застосовуватися для виготовлення валів, однак їхня реакція на термічну обробку є різною.

Основна увага приділялася впливу точності підтримання температури печі на результати гартування та поліпшення. Для порівняння розглянуто два варіанти роботи печі:

- традиційний режим із розкидом температури ± 10 °С;
- автоматизований режим із розкидом температури $\pm 1...2$ °С.

Як базовий режим для обох сталей прийнято нагрівання під гартування до 850 °С, витримку при заданій температурі, охолодження в оливі та подальший високий відпуск при 550 °С. Саме поєднання гартування з високим відпуском називають поліпшенням. Така обробка дозволяє отримати не максимальну твердість, а оптимальне співвідношення міцності, в'язкості та опору втомному руйнуванню, що особливо важливо для валів циркуляційних пил.

Під час нагрівання сталі до температури гартування відбувається перетворення феритно-перлітної структури в аустеніт. У сталі С45Е це перетворення відбувається менш стабільно по перерізу деталі через нижчу прогартуваність [7, 8]. Тому при недостатньому нагріванні або нерівномірності температурного поля можливе збереження ділянок фериту або перліту. Після охолодження це призводить до неоднорідної структури та помітного розкиду твердості.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У сталі 41Cr4 наявність хрому підвищує прогартовуваність і сприяє більш рівномірному утворенню мартенситу [9]. Після гартування структура цієї сталі переважно складається з голчастого або пластинчастого мартенситу з невеликою кількістю залишкового аустеніту. Такий стан характеризується високою твердістю, але підвищеною крихкістю. Саме тому після гартування обов'язково проводиться високий відпуск.

При високому відпуску мартенсит зазнає розпаду. Вуглець частково виходить із пересиченого твердого розчину, зменшуються внутрішні напруження, утворюються дисперсні карбідні частинки, а структура переходить у стан відпущеного мартенситу або сорбітоподібної структури. У результаті твердість дещо зменшується, але суттєво зростають ударна в'язкість, пластичність і стабільність властивостей.

Особливо важливим є те, що розкид температури в печі безпосередньо впливає на однорідність структурних перетворень. При розкиді $\pm 10^\circ\text{C}$ частина деталей або окремі ділянки однієї деталі можуть нагріватися до 840°C , а інші – до 860°C . У першому випадку можливе неповне завершення аустенітизації, а в другому – початок укрупнення аустенітного зерна. Обидва явища негативно впливають на стабільність механічних властивостей.

При автоматизованому контролі температури з точністю $\pm 1...2^\circ\text{C}$ температурний цикл стає значно стабільнішим. Це забезпечує більш однорідне утворення аустеніту, рівномірне мартенситне перетворення під час охолодження та більш передбачуваний результат після високого відпуску.

Для сталі C45E підвищення точності контролю температури зменшує розкид твердості та міцності, однак через відсутність легувальних елементів ця сталь усе одно поступається 41Cr4 за стабільністю властивостей після гартування.

Для сталі 41Cr4 ефект автоматизації є особливо помітним. Завдяки підвищеній прогартовуваності ця сталь краще реагує на правильно витриманий режим гартування. При точному підтриманні температури формується більш

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

однорідна мартенситна структура, яка після високого відпуску переходить у стабільний відпущений мартенсит. Це забезпечує менший розкид твердості, вищу межу міцності та кращу ударну в'язкість.

Таблиця 2.2 – Результати досліджень для сталі С45Е

Показник	Піч із розкидом $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Автоматизована піч $\pm 1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$
HRC після гартування	52...57	54...55
HRC після поліпшення	24...31	27...29
Межа міцності σ_b , МПа	720...860	780...820
Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	500...650	560...610
Ударна в'язкість KCU, Дж/см ²	40...70	55...65
Розкид твердості	до 5 HRC	до 1 HRC

Таблиця 2.3 – Результати досліджень для сталі 41Cr4

Показник	Піч із розкидом $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Автоматизована піч з розкидом $\pm 1...2\text{ }^{\circ}\text{C}$
HRC після гартування	54...60	57...58
HRC після поліпшення	30...38	33...35
Межа міцності σ_b , МПа	850...1100	950...1020
Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	700...900	780...850
Ударна в'язкість KCU, Дж/см ²	50...90	65...82
Розкид твердості	4...6 HRC	1...2 HRC

Таблиця 2.4 – Вплив точності підтримання температури на результати поліпшення сталі 41Cr4

Показник	Традиційна піч $\pm 10^{\circ}\text{C}$	Автоматизована піч SIMATIC S7 $\pm 1...2^{\circ}\text{C}$
Середня твердість після поліпшення, HRC	34	34
Максимальна твердість, HRC	38	35
Мінімальна твердість, HRC	30	33
Розкид твердості, HRC	8	2
Межа міцності σ_b , МПа	850...1100	950...1020
Ймовірність браку	5...8 %	менше 1 %

Наведені результати показують, що середнє значення твердості після поліпшення може бути подібним для обох варіантів печі. Проте головна перевага автоматизованої системи полягає не лише у підвищенні середнього показника, а в різкому зменшенні розкиду властивостей. Саме стабільність є основною вимогою до термічної обробки відповідальних деталей машин.

На рівні мікроструктури це пояснюється тим, що при точному температурному контролі всі зразки проходять однаковий цикл аустенітизації, гартування та відпуску. У результаті після поліпшення формується дрібнодисперсна структура відпущеного мартенситу з рівномірним розподілом карбідів. Така структура забезпечує поєднання високої міцності, достатньої в'язкості та стійкості до втомного руйнування.

При розкиді температури $\pm 10^{\circ}\text{C}$ структура після термічної обробки може бути неоднорідною. В одних ділянках можливе утворення недостатньо загартованої структури з залишками фериту або перліту, в інших – формування грубішого мартенситу внаслідок перегріву. Після відпуску така неоднорідність

повністю не усувається, тому механічні властивості різних зразків або різних зон однієї деталі можуть істотно відрізнятися.

Для досліджуваного вала циркуляційної пили це має принципове значення. Вал працює в умовах кручення, згину, вібрацій і циклічних навантажень. Тому небезпечним є не лише недостатній рівень твердості, а й локальна неоднорідність структури, яка може стати причиною концентрації напружень і зародження втомних тріщин.

2.5. Результати металографічних досліджень

2.5.1. Мікроструктура сталі 41Cr4 у стані поставки

У стані поставки сталь 41Cr4 характеризується типовою феритно-перлітною структурою (рисунок 2.2). Світлі ділянки відповідають фериту, а темні колонії – перліту. Перліт рівномірно розподілений у феритній матриці, що забезпечує задовільне поєднання міцності та пластичності матеріалу. Ознак перегріву, значного росту зерна або структурної неоднорідності не спостерігається.

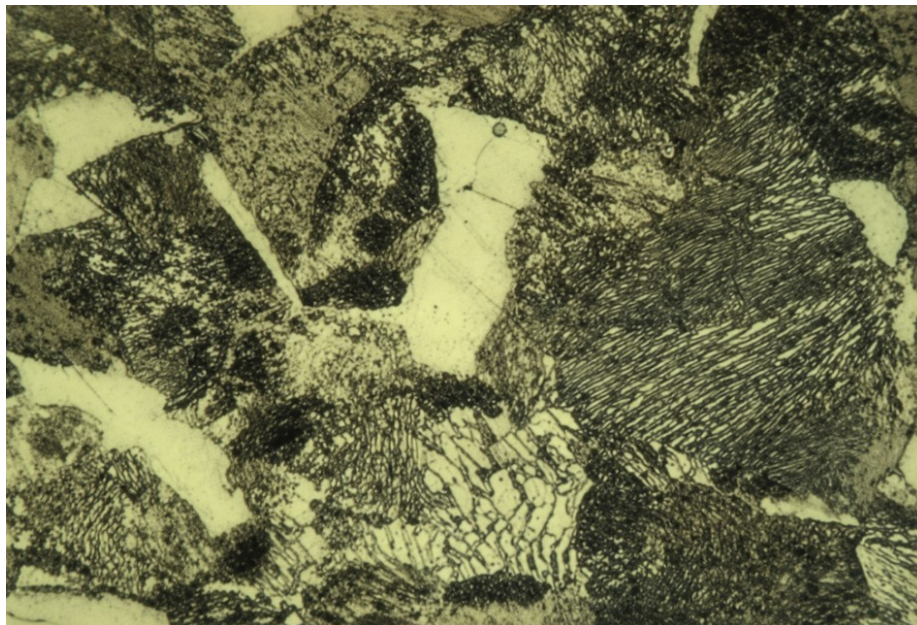


Рисунок 2.2. – Мікроструктура сталі 41Cr4 у стані поставки. x800

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Така структура є характерною для гарячекатаного або нормалізованого стану сталі та слугує вихідним структурним станом перед термічною обробкою.

2.5.2. Мікроструктура сталі 41Cr4 після гартування при коливаннях температури $\pm 10^{\circ}\text{C}$

Після гартування в структурі переважає голчастий мартенсит. Водночас спостерігається певна неоднорідність структури, обумовлена коливаннями температури під час нагрівання. В окремих ділянках можуть бути присутні залишки фериту або продукти неповного мартенситного перетворення. Також можливе локальне укрупнення аустенітного зерна внаслідок перегріву окремих зон деталі. Отримана структура характеризується підвищеним розкидом твердості та нерівномірністю механічних властивостей по об'єму металу (рисунок 2.3).

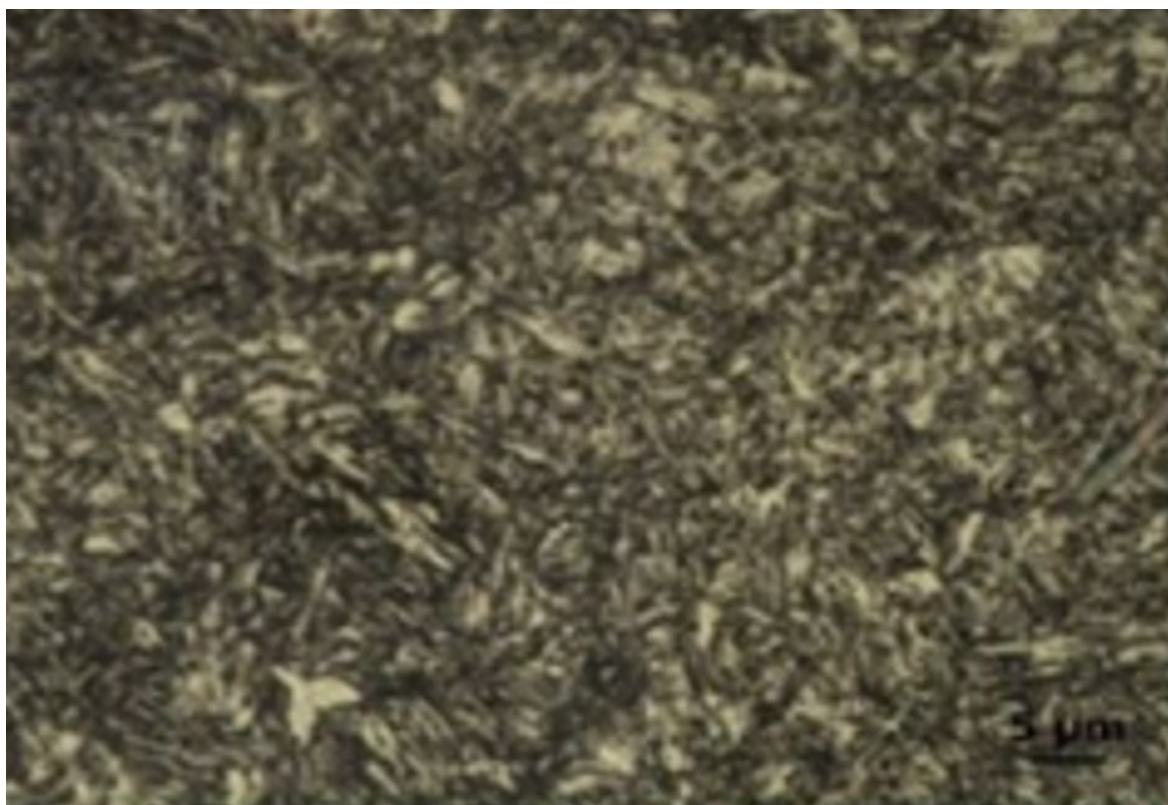


Рисунок 2.3. – Мікроструктура сталі 41Cr4 після гартування при коливаннях температури $\pm 10^{\circ}\text{C}$. $\times 800$

2.5.3. Мікроструктура сталі 41Cr4 після гартування при коливаннях температури $\pm 1...2^{\circ}\text{C}$

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після гартування за умов автоматизованого контролю температури формується більш однорідна мартенситна структура. Голки мартенситу мають рівномірний розподіл по всьому полю шліфа, ознаки перегріву та локального росту зерна практично відсутні. Завдяки стабільному температурному режиму забезпечується повна аустенітизація металу та рівномірне мартенситне перетворення під час охолодження. Отримана структура характеризується мінімальним розкидом твердості та високою відтворюваністю механічних властивостей (рисунок 2.4).

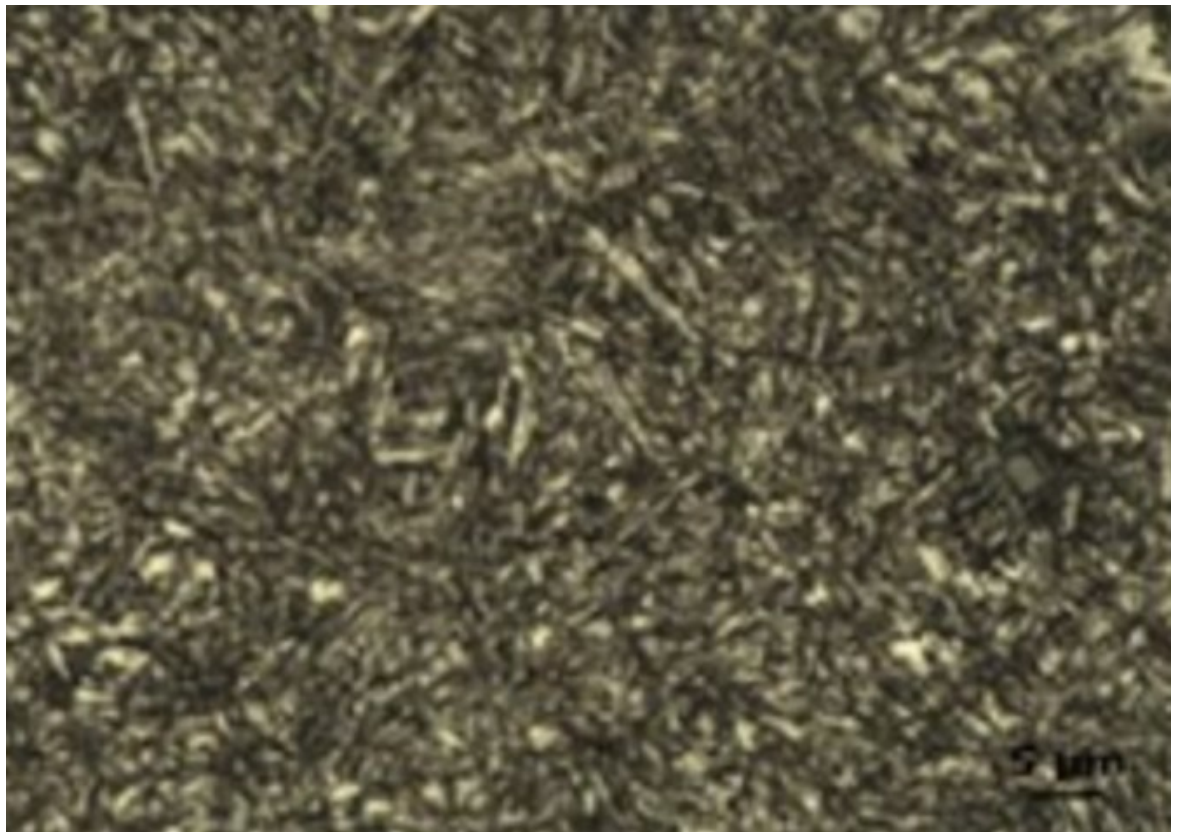


Рисунок 2.4. – Мікроструктура сталі 41Cr4 після гартування при коливаннях температури $\pm 1...2$ °C. $\times 800$

2.5.4. Мікроструктура сталі 41Cr4 після поліпшення (гартування та високого відпуску)

Після проведення високого відпуску мартенситна структура зазнає розпаду з утворенням відпущеного мартенситу. У структурі спостерігається рівномірний розподіл дрібнодисперсних карбідних частинок у феритній матриці. Голчаста будова мартенситу стає менш вираженою внаслідок

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження внутрішніх напружень та перебігу дифузійних процесів. Отримана структура характеризується оптимальним поєднанням міцності, пластичності та ударної в'язкості. Саме такий структурний стан є найбільш сприятливим для валів циркуляційних пил, які працюють в умовах циклічних навантажень, вібрацій та змінних напружень.

Порівняння мікроструктур показує, що застосування автоматизованого контролю температури під час гартування забезпечує більш однорідний структурний стан після термічної обробки та створює передумови для отримання стабільних механічних властивостей після поліпшення (рисунок 2.5).

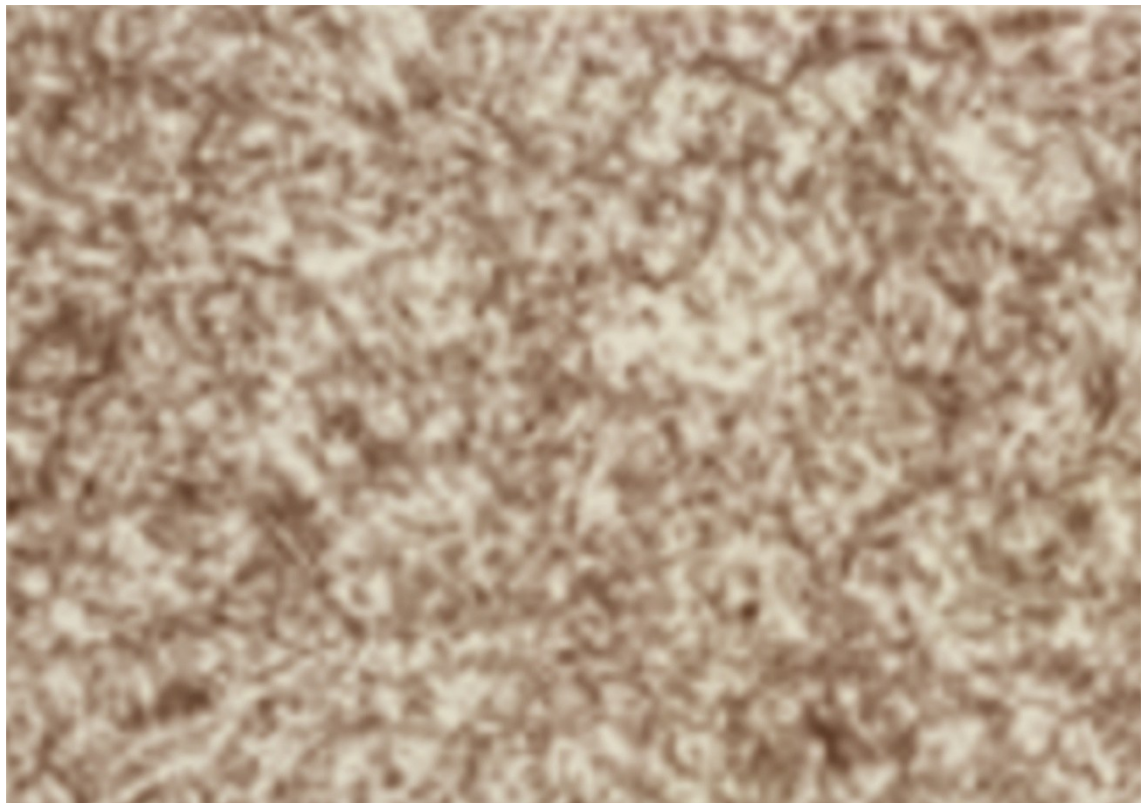


Рисунок 2.5. – Мікроструктура сталі 41Cr4 після гартування високого відпуску при коливаннях температури $\pm 1...2$ °C. x800

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6. Аналіз методів автоматичного регулювання температури та обґрунтування вибору PID-регулятора для шахтної печі гартування

Якість термічної обробки сталевих виробів значною мірою залежить від точності підтримання температурного режиму нагрівання. Для сталі 41Cr4, що використовується для виготовлення досліджуваного вала циркуляційної пили, температура аустенітизації становить приблизно 840...860 °С. Відхилення температури від оптимального значення може призвести до неповного розчинення карбідів, неоднорідної аустенітизації або перегріву металу з подальшим укрупненням зерна. Тому система автоматичного регулювання температури повинна забезпечувати високу точність підтримання заданого режиму та швидке реагування на зміну умов роботи печі.

Шахтна піч належить до об'єктів із великою тепловою інерцією та значним запізненням реакції. Після зміни потужності нагрівальних елементів температура в робочому просторі змінюється поступово, а максимальний ефект від керуючого впливу може проявлятися через декілька хвилин. Крім того, на процес впливають маса завантажених деталей, теплоємність матеріалу, стан футерівки печі та умови теплообміну. У зв'язку з цим особливого значення набуває правильний вибір алгоритму автоматичного регулювання.

2.6.1. Двопозиційне регулювання

Найпростішим способом керування температурою є двопозиційне або релейне регулювання. Принцип його роботи полягає у ввімкненні нагрівачів при зниженні температури нижче заданого значення та вимкненні після досягнення необхідної температури.

Перевагами такого способу є простота реалізації та низька вартість обладнання. Проте для шахтних печей він має ряд суттєвих недоліків. Через значну теплову інерцію після вимкнення нагрівачів температура продовжує зростати, що викликає перегрів. Після охолодження температура знижується

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нижче заданого значення, і цикл повторюється. Внаслідок цього виникають значні коливання температури, які можуть досягати $\pm 10...15^{\circ}\text{C}$.

Для процесів гартування конструкційних сталей такі відхилення є небажаними, оскільки призводять до нестабільності структури та механічних властивостей готових виробів.

2.6.2. Трипозиційне регулювання

Більш досконалим рішенням є трипозиційне регулювання. У цьому випадку нагрівачі можуть працювати на декількох рівнях потужності: максимальному, зниженому або бути вимкненими.

Такий спосіб дозволяє зменшити амплітуду коливань температури порівняно з двопозиційним керуванням. Однак через ступінчастий характер зміни потужності повністю усунути перерегулювання не вдається. Крім того, ефективність такого способу значною мірою залежить від правильно обраних порогів перемикання.

2.6.3. Пропорційне регулювання (Р-регулятор)

Пропорційний регулятор формує керуючий сигнал пропорційно величині поточної похибки регулювання. Чим більша різниця між заданою та фактичною температурою, тим більша потужність подається на нагрівачі.

Основною перевагою Р-регулятора є швидке реагування на зміну температури. Проте такий регулятор не здатний повністю усунути статичну похибку. У сталому режимі температура може відрізнятись від заданої на декілька градусів.

Для термічної обробки відповідальних деталей така похибка є небажаною, оскільки навіть незначне відхилення температури може впливати на процеси аустенітизації.

2.6.4. Пропорційно-інтегральне регулювання (PI-регулятор)

PI-регулятор поєднує пропорційну та інтегральну складові. Інтегральна частина накопичує похибку регулювання в часі та забезпечує її повне усунення.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняно з Р-регулятором РІ-регулятор забезпечує більш високу точність підтримання температури. Саме тому він широко застосовується в системах керування технологічними процесами.

Однак при значній тепловій інерції печі можливе виникнення перерегулювання та коливань температури під час виходу на заданий режим.

2.6.5. PID-регулювання

Найбільш ефективним способом автоматичного керування температурою шахтної печі є використання PID-регулятора. Його робота базується на трьох складових:

- пропорційній (Р);
- інтегральній (І);
- диференціальній (D).

Пропорційна складова забезпечує швидке реагування на поточну похибку температури. Інтегральна складова усуває статичну похибку та дозволяє підтримувати температуру точно на заданому рівні. Диференціальна складова враховує швидкість зміни температури та дозволяє прогнозувати подальший розвиток процесу.

Саме диференціальна складова має особливе значення для шахтних печей. Вона дозволяє зменшити перерегулювання та компенсувати вплив теплової інерції. У результаті температура виходить на задане значення плавно, без значних коливань.

Практика застосування PID-регуляторів у термічному обладнанні показує, що точність підтримання температури може становити $\pm 1...2$ °С, що повністю відповідає вимогам до процесів гартування та поліпшення конструкційних сталей.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7. Обґрунтування вибору апаратних засобів автоматизації

Для реалізації системи автоматичного контролю температури обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200 у складі центрального процесора CPU1212C та аналогового модуля SM 1231 TC.

Процесор CPU1212C є одним із найбільш поширених контролерів Siemens для автоматизації малих і середніх технологічних установок. Він характеризується високою надійністю, підтримкою промислових протоколів зв'язку, можливістю роботи з HMI-панелями та наявністю вбудованих функцій технологічного керування.

Для вимірювання температури використовується модуль SM 1231 TC, спеціально призначений для роботи з термопарами. Модуль підтримує термопари типів K, J, N, R, S, T та інші, виконує автоматичну компенсацію температури холодного спаю та забезпечує безпосереднє перетворення сигналу термопари в цифрове значення температури.

Для контролю температури шахтної печі доцільно використовувати термопару типу K, яка забезпечує роботу в діапазоні до 1300 °C та характеризується достатньою точністю вимірювання для процесів термічної обробки конструкційних сталей.

Переваги використання PID Compact у TIA Portal

У середовищі TIA Portal реалізований спеціалізований функціональний блок PID Compact, який значно спрощує створення систем автоматичного регулювання.

Основними перевагами PID Compact є:

- автоматичне налаштування параметрів регулятора;
- підтримка режиму автонастроювання;
- вбудовані засоби візуалізації процесу регулювання;
- можливість роботи з аналоговими сигналами від термопар;
- інтеграція з HMI-панелями SIMATIC;

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– простота налаштування та експлуатації.

Використання PID Compact дозволяє реалізувати систему автоматичного керування без розроблення складних математичних моделей об'єкта та забезпечити стабільне підтримання температури в робочому просторі печі.

2.8. Висновки

У результаті аналізу сучасних методів автоматичного регулювання температури встановлено, що для шахтних печей гартування найбільш ефективним є застосування PID-регулятора. На відміну від двопозиційних та трипозиційних систем керування, PID-регулятор забезпечує плавне регулювання потужності нагрівальних елементів, зменшує перерегулювання та враховує теплову інерційність об'єкта керування.

Для реалізації системи автоматичного контролю температури обрано програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200 у складі процесора CPU1212C та модуля аналогового введення SM 1231 TC. Застосування даного обладнання забезпечує безпосереднє підключення термопар, високу точність вимірювання температури, можливість архівування технологічних параметрів та інтеграцію з операторськими панелями HMI.

Розроблена структура автоматизованої системи керування дозволяє реалізувати автоматичне підтримання температури нагрівання, контроль технологічних режимів термічної обробки та оперативний моніторинг стану обладнання. Використання функціонального блоку PID Compact середовища TIA Portal значно спрощує налаштування системи та забезпечує можливість автоматичної оптимізації параметрів регулятора.

Проведений аналіз показав, що впровадження запропонованої системи дозволяє зменшити коливання температури в робочому просторі печі з ± 10 °C до $\pm 1...2$ °C, підвищити точність виконання режимів гартування та відпуску, а

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також створити умови для отримання більш стабільних результатів термічної обробки.

Отже, використання контролера SIMATIC S7-1200 з модулем SM 1231 TC та PID-регулятором є технічно обґрунтованим рішенням для автоматизації шахтної печі гартування та забезпечення високої точності підтримання температурного режиму.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Розробка технології термічної обробки в значній мірі залежить від величини температури операцій термічної обробки, часу операції, застосованої автоматизації контролю температури печі та її точності тощо. Для довгомірних деталей типу вал з метою зменшення термічних деформацій зазвичай використовують шахтні печі з контролем температури по висоті печі

3.1. Вимірювання температури термопарами

Розглянемо програмування процесу вимірювати температуру за допомогою термопари типу ТС (тип К) в програмі Totally Integrated Automation PORTAL, основна ідея якого – об'єднати в одному програмному середовищі роботу з ПЛК, НМІ-панелями, приводами, мережами, системами візуалізації, діагностикою та частково з енергоменеджментом. SIEMENS офіційно позиціонує TIA Portal як єдину платформу для ефективного інжинірингу автоматизації, зокрема для STEP 7, WinCC і Startdrive.

Для підключення датчика температури до процесора використовується модуль ПЛК SM 1231 – модуль сигналів термопар.

Цей модуль має 4 входи, тобто до нього можна підключити 4 температурні датчики (термопари).

Модуль SM 1231 вимірює напругу на своїх входах, тобто на входах, до яких підключені термопари.

Отримане значення може бути представлене як температура або як напруга.

Якщо вибрано режим відображення напруги, то на вході, до якого підключена термопара, значення становитиме 27648 для максимальної температури, яку може виміряти цей датчик.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо вибрано режим відображення температури, то модуль показуватиме температуру, яка у 10 разів більша за фактичну, тому це значення необхідно поділити на 10.

Дані термопар із діапазонами вимірюваних температур та їхньою точністю наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Межі та точність вимірювання термопар різних типів

Тип термопари	Мінімум нижче межі	Нормальна нижня межа	Нормальна верхня межа	Максимум вище межі	Точність в нормальній межі, 25 °C
J	-210,0 °C	-150,0 °C	1200,0 °C	1450,0 °C	±0,3 °C
K	-270,0 °C	-200,0 °C	1372,0 °C	1622,0 °C	±0,4 °C
T	-270,0 °C	-200,0 °C	400,0 °C	540,0 °C	*0,5 °C
E	-270,0 °C	-200,0 °C	1000,0 °C	1200,0 °C	±0,3 °C
R&S	-50,0 °C	+100,0 °C	1768,0 °C	2019,0 °C	±1,0 °C
N	-270,0 °C	-200,0 °C	1300,0 °C	1550,0 °C	±1,6 °C
C	0,0 °C	100,0 °C	2315,0 °C	2500,0 °C	±0,7 °C
TXK/XK(l)	-200,0 °C	-150,0 °C	800,0 °C	1050,0 °C	±06 °C
Voltage	-32512 - 94,0715mV	-27648 -80mV	27648 80mV	32511 94,071mV	±0,05%

Для вимірювання температури приймаємо термопари типу K.

Програмування контролера для вимірювання температури печі за допомогою термопар проводимо в програмі TIA Portal V15, використовуючи демоверсію з 21 денним доступом. Програмування графічне інтуїтивне. В якості процесора вибираємо модуль CPU1212C SIMATIC S7-1200 та модуль SM 1231 TC (рисунок 3.1).

Модуль SM 1231 AI4 x TC x 16 bit вибираємо у конфігурації обладнання (Hardware Configuration).

Він має чотири аналогові входи (рисунок 3.2), які позначаються Channel0...Channel3.

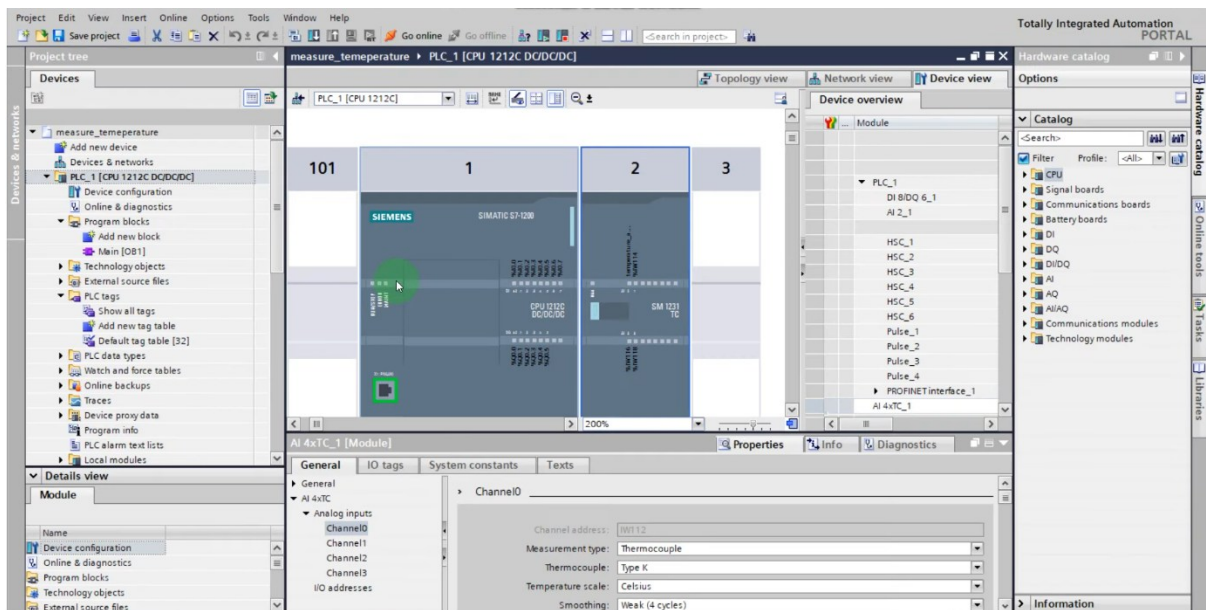


Рисунок 3.1 – Вибір процесора CPU1212C SIMATIC S7-1200 та модуля SM 1231 TC

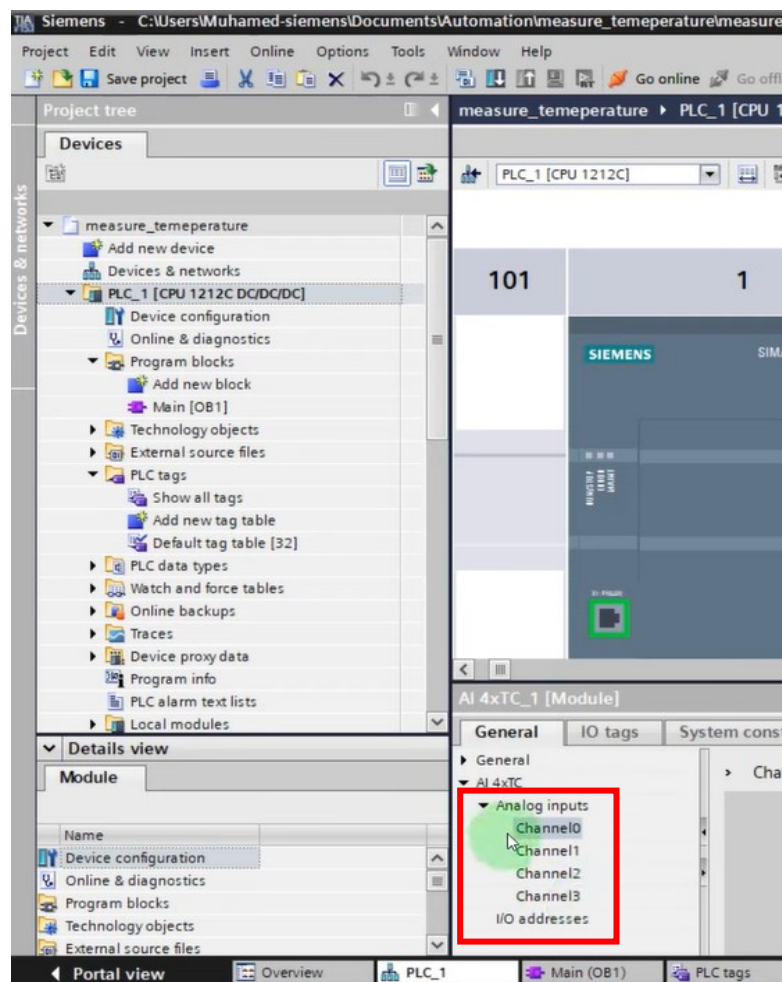


Рисунок 3.2 – Вибір аналогових входів модуля SM 1231 AI4 x TC x 16 bit

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

БР 6226.00.00.000 ПЗ

Використовуватимемо перший вхід із адресою (тегом) %IW112.

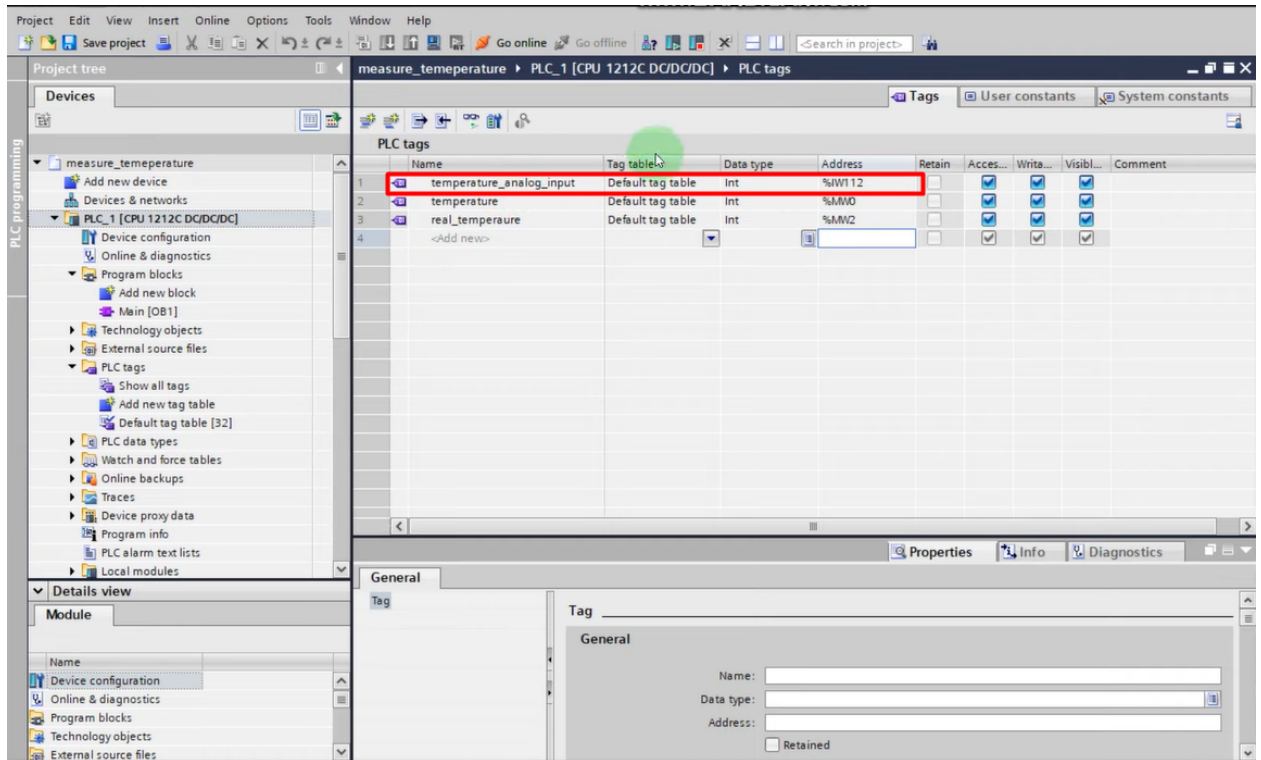


Рисунок 3.3 – Прописування адреси входу аналогового модуля SM 1231 AI4

На рисунку 3.4 видно результат визначення тега із цією адресою.

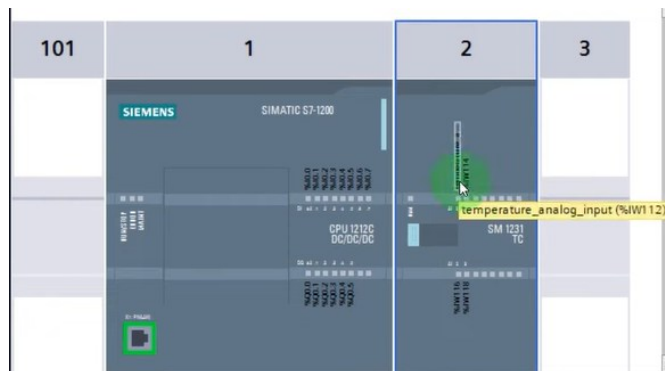


Рисунок 3.4 – Відображення параметрів області

введення аналогових даних тега термопар

Далі обираємо Measurement Type (тип вимірювання), тобто «Voltage» (напруга) або «Temperature» (температура) (рисунок 3.5).

Далі обираємо тип термопар (рисунок 3.6).

Далі вибираємо одиницю вимірювання температури (градус Цельсія чи за Фаренгейтом) і Згладжування (дані температури брати за 1 / 4 / 16 / 32 цикли). Приймаємо параметр Smoothing рівний 4 цикли (рисунок 3.7)

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

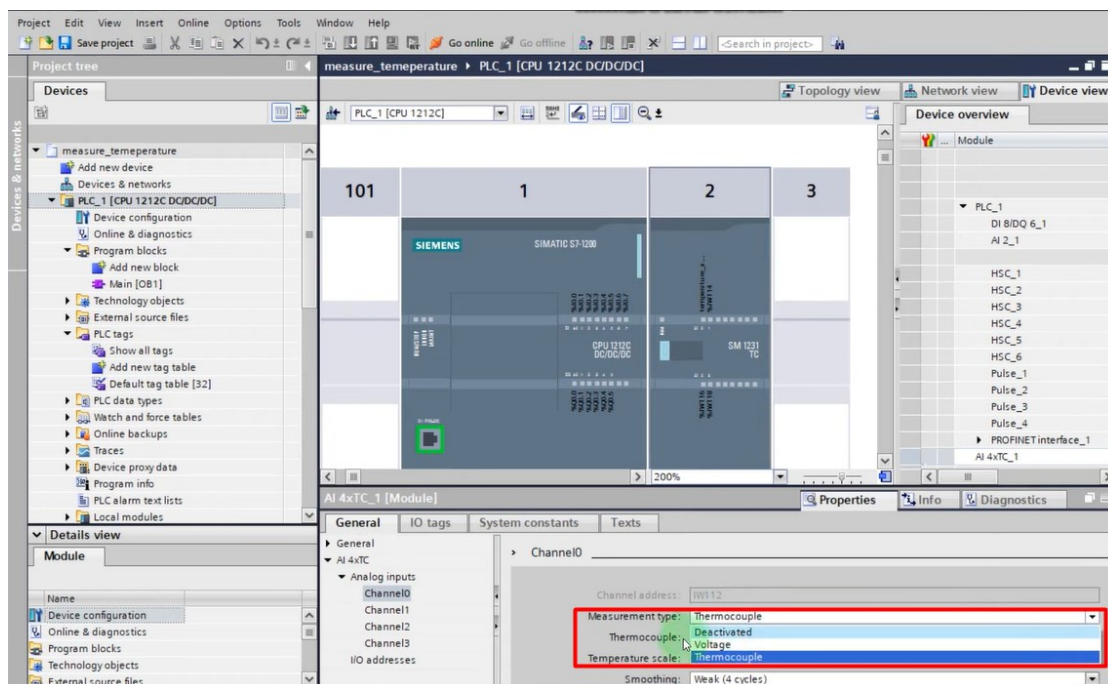


Рисунок 3.5 – Вибір типу вимірювання

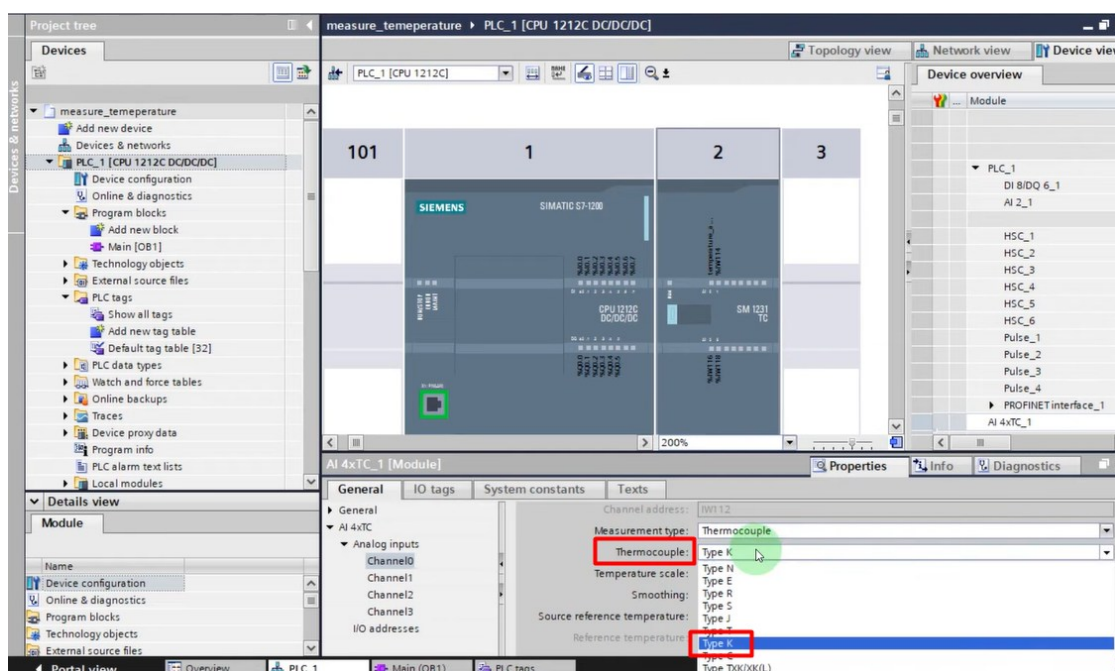


Рисунок 3.6 – Вибір типу термодари

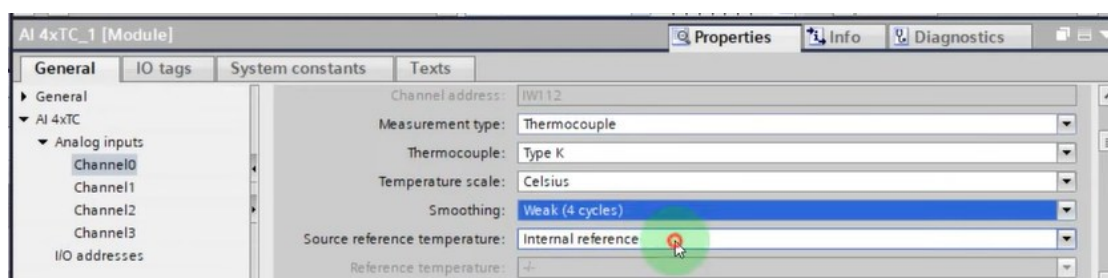


Рисунок 3.7 – Призначення параметра згладжування

В Network 1 головного програмного блока (Main (OB1)) буде відображатися значення температури, збільшене у 10 разів, якщо для параметра Measurement Type вибрано значення Temperature (рисунок 3.8).

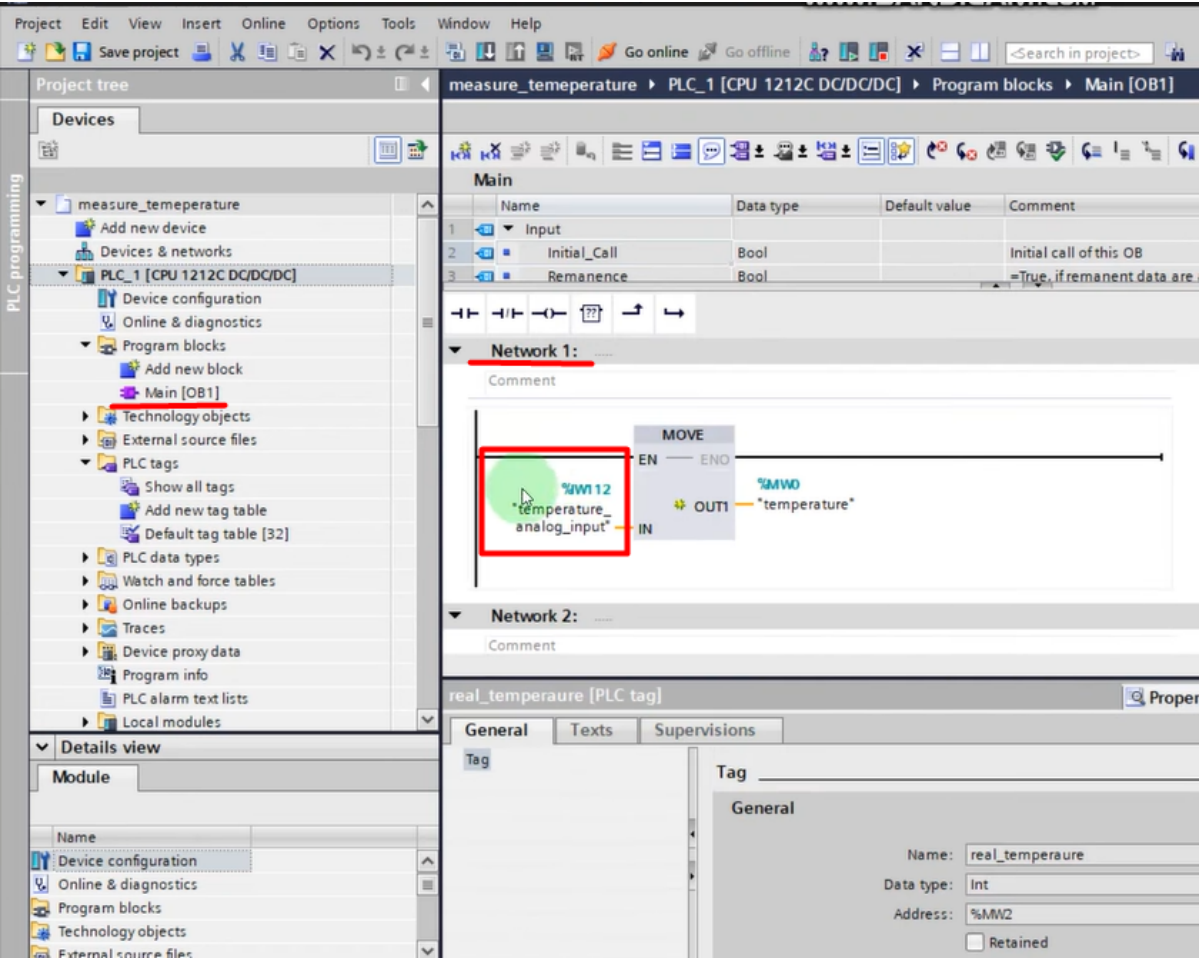


Рисунок 3.8 – Network 1 програмного блока (Main (OB1))

Для відображення реальної температури у градусах Цельсія поділимо це значення на 10 ($IN2=10$) з використанням команди ділення (DIV), встановивши тип даних Int (ціле число), щоб отримати фактичну температуру за адресою %MW2 і для цього створимо Network 2 (рисунок 3.9).

Тепер нагріємо датчик і спостерігаємо, як температура збільшується (рисунок 10).

Таким чином, ми маємо запрограмоване підключення термопар з діапазоном робочих температур до 1300 °C типу K (Додаток Б, рисунок Б.1) до CPU1212C SIMATIC S7-1200 через модуль SM 1231 TC. Для виведення температури використовуємо адресу %MW2 (тип пам'яті – WORD).

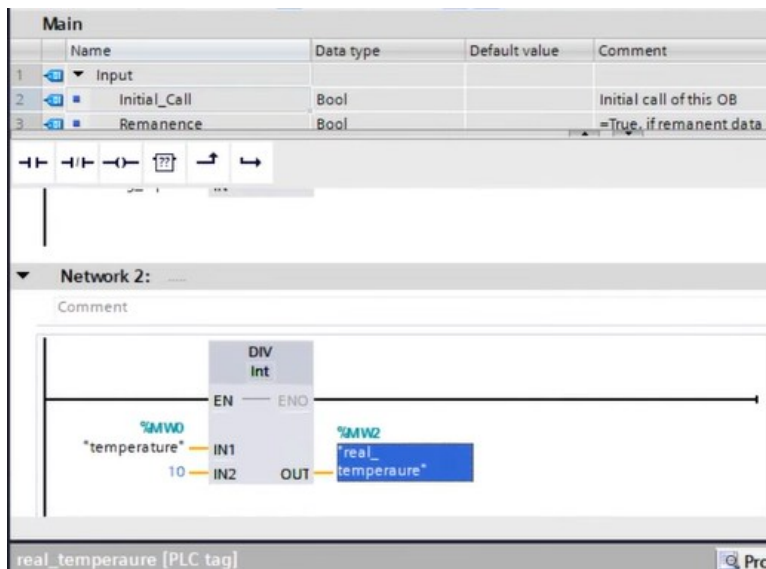
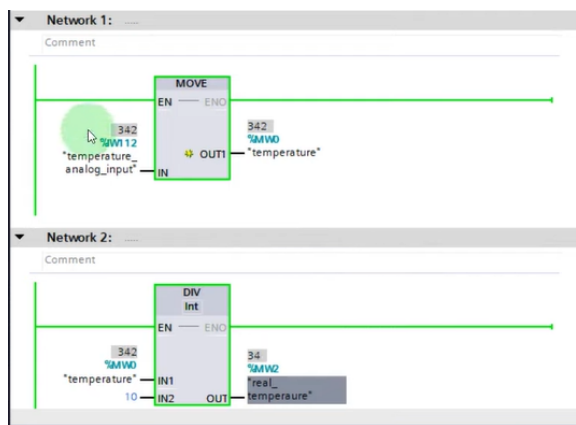
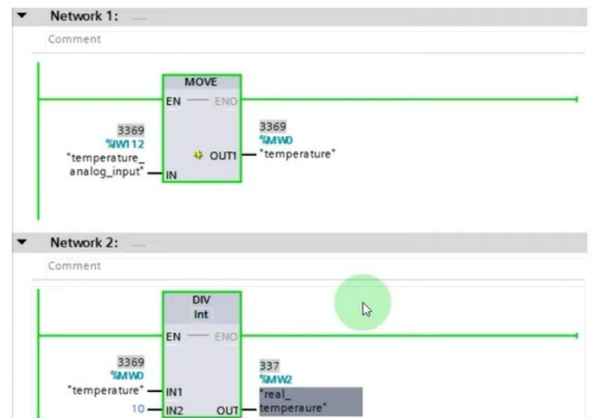


Рисунок 3.9 – Створення тега реальної температури "real temperature" у Network 2



а



б

Рисунок 3.10 – Моделювання зростання температури від 34 °С до 337 °С в ТІА Portal V15

3.2 Регулювання температури за допомогою ПІД-регулятора

Ми створюємо ПІД-регулятор у циклічному перериванні, оскільки час циклу циклічного переривання менший, ніж у головному блоці OB1.

Встановлюємо задане значення, тобто значення температури, яке має підтримувати ПІД-регулятор, у цьому прикладі це 850 °С (рисунок 3.11).

Температурний зонд підключено до аналогового входу.

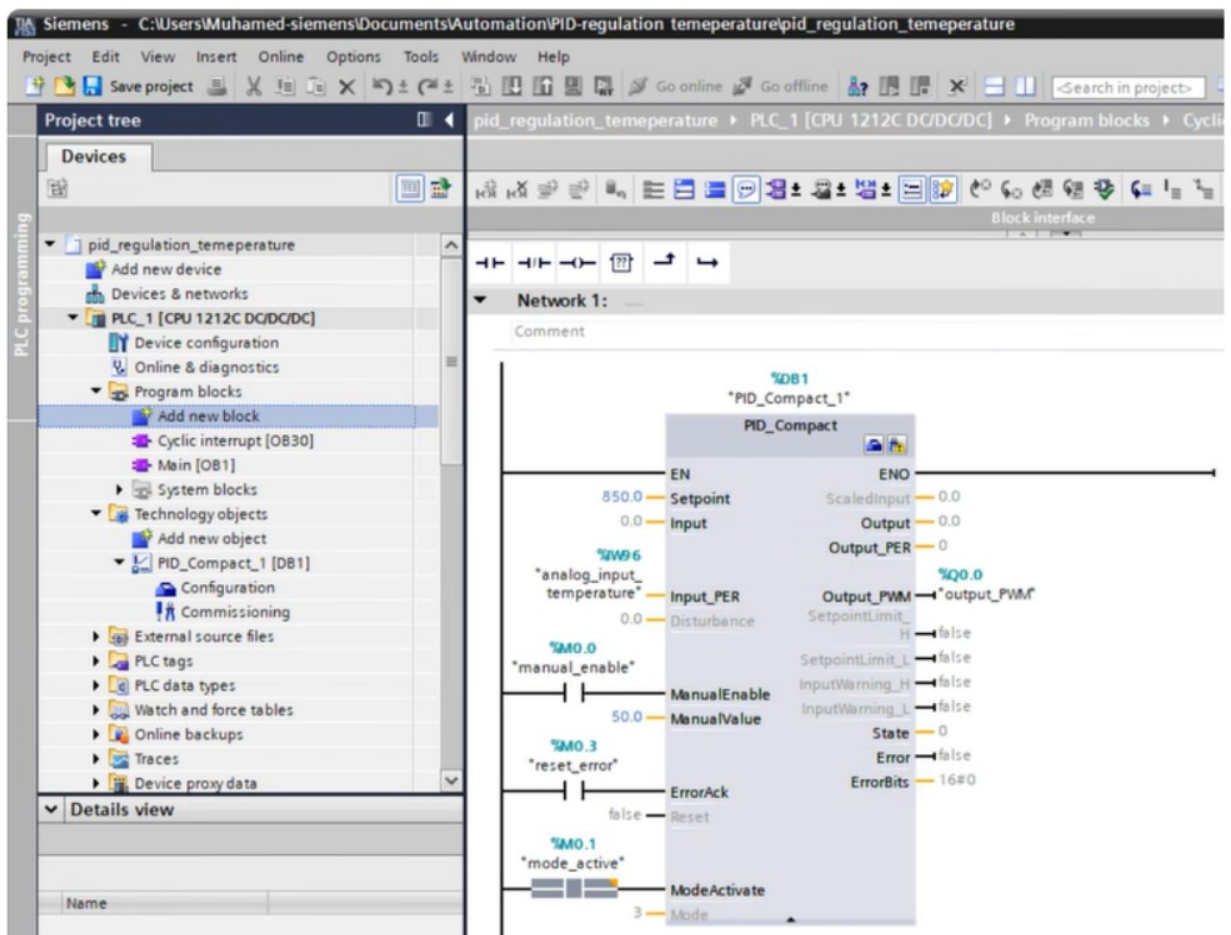


Рисунок 3.11 – Встановлені значення ПІД-регулятора

Тут ми налаштовуємо цей аналоговий вхід, тобто тип зонда та інші параметри, пов'язані з зондом

Ручний режим, у цьому прикладі це 50, що означає, що якщо вибрано ручний режим, на виході ПІД-регулятора буде 50 відсотків (ManualValue), незалежно від значення температури, виміряного зондом.

Reset – вхід скидання помилки на ПІД-контролері

Mode – це вхід для активації режиму, у нашому прикладі це 3, що означає автоматичний режим.

Встановлюємо компактний ПІД-регулятор (рисунок 3.1). Тут ми вибираємо фізичну змінну, яку контролюємо – температуру.

Далі встановлюємо тип входу та виходу для ПІД-регулятора (рисунок В.1, додатку В).

Далі призначаємо обмеження, у цьому прикладі обмеження становить від 40 до 850 °C (рисунок В.2, додатку В).

Далі налаштовуємо масштабування вхідного сигналу. Тут температура на аналоговому вході в 10 разів вища за фактичну температуру, тому масштабоване значення процесу має бути на 10 пунктів нижчим. Від 400 до 40 та від 8500 до 850 (рисунок В.3, додатку В).

Тут ми встановлюємо вихід увімкнення/вимкнення, який налаштовано на ШІМ. Щоб уникнути частого ввімкнення та вимкнення виходу встановлено затримку 1 с.

Видно, що якщо ввімкнено ручний режим, вихід завжди на рівні 50 відсотків, незалежно від того, як змінюється температура на вході (рисунок В.4, додатку В).

Тепер включаємо автоматичний режим

Ми бачимо, що фактична температура менша за задане значення, вихідний сигнал становить 100 відсотків (рисунок В.5, додатку В), а вихідний сигнал ШІМ має значення TRUE (істина).

Коли вхідна температура підвищується та досягає заданого значення, вихід переходить у стан FALSE (ХИБНИСТЬ).

Коли температура падає нижче заданого значення, вихід вмикається.

Слід пам'ятати і що важливо, так це те, що коли вхідна температура перевищує задане значення, вихід вимикається, якщо ж падає нижче заданого значення, вхід вмикається. Отже, коли між заданим значенням і вхідною температурою є велика різниця, то вихід завжди має значення TRUE, а коли вони близькі, він вмикається по черзі.

Тут видно, що задане значення та температура на вході "близькі", а потім вихідна температура становить приблизно 1-2 градуси.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Укладання технологічного процесу термічної обробки вала циркуляційної пили

Технологічний процес термічної обробки вала циркуляційної печі зі сталі 41Cr4 і максимальним діаметром 45 мм з автоматизація контролю температури печі з використанням ПЛК SIMATIC S7-1200 CPU1212C (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Технологічний процес термічної обробки вала

Операція	Параметр	Значення	Обладнання
Нагрівання під гартування	Температура	840...860 °C	Шахтна електропеч із PID-регулюванням температури
	Оптимальна температура	850 °C	
Контроль температури	Точність підтримання	±1...2 °C	CPU1212C + SM1231 TC +термопара типу К
Витримка під гартування	Час витримки	35...45 хв	Автоматичний таймер ПЛК
Гартування	Середовище	Індустріальна гартувальна олива	Гартувальний бак із системою перемішування та з контролем температури
	Температура оливи	40...80 °C	
Високий відпуск	Температура	540...560 °C	Шахтна електропеч із PID-регулюванням, автоматичне керування циклом
	Оптимальна температура	550 °C	
	Час витримки	1,5...2 год	
Охолодження після відпуску	На повітрі	До повного охолодження	Стелаж охолодження
Контроль твердості	Твердість	32...38 HRC	Твердомір Rockwell ТК-2М
Металографічний контроль	Структура	Відпущений мартенсит	Металографічний мікроскоп METAM PB-23
Архівування параметрів	Температура, час	Безперервний запис	HMI-панель SIMATIC KTP700 Basic
Візуалізація процесу	Моніторинг режиму	Онлайн	SIMATIC KTP700 Basic

Укладений технологічний процес містить контрольні операції в процесі виробництва після більшості операцій та архівування параметрів роботи обладнання, що в повній мірі відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT).

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Для підвищення якості процесу гартування запропоновано використання гартувального бака для охолодження валів після нагрівання в шахтній печі. Конструкція бака має забезпечувати швидке та рівномірне занурення деталей у гартувальне середовище, стабільну температуру оливи та достатню інтенсивність її перемішування.

4.1. Завантажувальний пристрій для подачі валів у гартувальний бак

Схема бака гартувального наведена на рисунку 4.1.

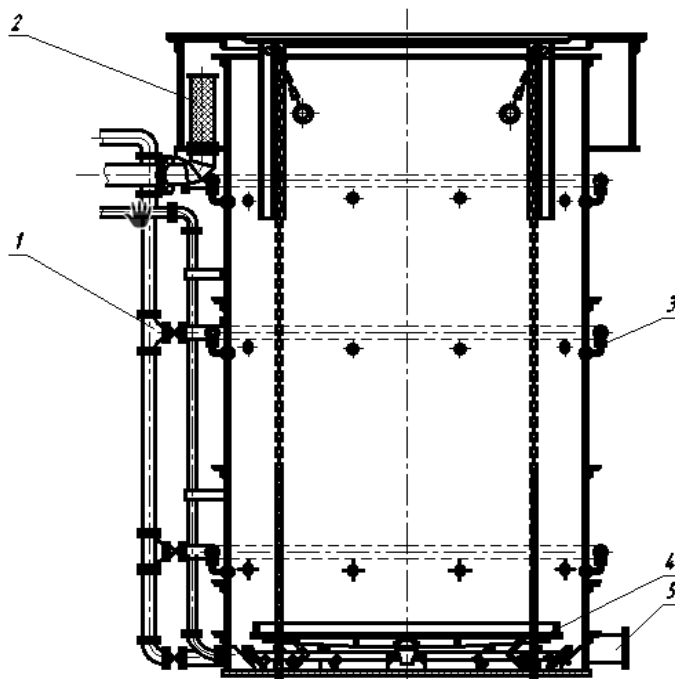


Рисунок 4.1 – Бак гартувальний

- 1 – система підведення охолодженої рідини;
- 2 – система фільтрації; 3 – спреєр;
- 4 – піддон; 5 – система швидкого випуску

Касети з деталями з використанням стаціонарного поворотного крана переміщуються в бак гартувальний і встановлюються на піддон 4.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система фільтрації 2 очищує верхню поверхню від спливаючих забруднень. В об'єм баку через спреєр 3 постійно подається необхідна кількість холодної оливи, що забезпечує температуру оливи в баку менше 60 °С. В разі стрімкого зростання температури спреєр вмикається на повну пропускну здатність, надлишок оливи, який не встигає зібрати фільтруюча система зливають в систему швидкого випуску 5, яка контролюється на предмет відсутності падіння рівня оливи в баку. Деталі в бак подаються спеціально спроектованими касетами.

Використання гартувального бака сприяє підвищенню стабільності структурних перетворень, забезпечує формування однорідної мартенситної структури після гартування, підвищує якість термічної обробки, зменшує ймовірність браку та покращує експлуатаційну надійність валів. Враховуючи специфіку будови шахтної печі гартувальний бак робимо також циліндричної (шахтної) форми.

4.2. Конструкція касет для подачі валів у гартувальний бак

Для гартування довгих валів застосувати доцільно застосовувати не класичний «кошик», а термостійку касету (підвіску) для вертикального завантаження валів у шахтну піч. Оскільки досліджувані вали мають довжину близько 480 мм і максимальний діаметр 45 мм, їх бажано розміщувати у вертикальному положенні, що забезпечує рівномірний нагрів і мінімізує ризик викривлення.

Конструктивно така касета складається з циліндричного каркаса (верхня опорна та нижня плита, вертикальні стійки; напрямна плита; гнізда для встановлення валів;) виготовленого з жаростійкої сталі AISI 310S (рисунок В.1, додаток В). Основними елементами є: верхня опорна плита з підйомною проушиною; вертикальні стійки каркаса; проміжна напрямна плита; гнізда для встановлення валів; центральна підвісна штанга.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання підвищення якості термічної обробки валів циркуляційних пил шляхом автоматизації контролю температури шахтної печі з використанням програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1200.

1. Встановлено, що вал циркуляційної пили працює в умовах дії крутних моментів, згинальних навантажень, вібрацій та циклічних напружень, що обумовлює необхідність забезпечення високої міцності, зносостійкості та довговічності.

2. Проведено порівняльний аналіз сталей C45E та 41Cr4 за хімічним складом, механічними властивостями, прокаліюваністю, технологічністю та вартістю. Встановлено, що сталь 41Cr4 (1.7035) є найбільш раціональним матеріалом для виготовлення досліджуваного вала завдяки високій прокаліюваності, міцності після поліпшення та меншій чутливості до коливань режимів термічної обробки.

3. Обґрунтовано режим термічної обробки вала зі сталі 41Cr4: гартування від 850 °C в оливі та високий відпуск при 550 °C. Встановлено, що після поліпшення формується структура відпущеного мартенситу, яка забезпечує твердість 32...38 HRC, межу міцності 900...1050 МПа та високий опір втомному руйнуванню.

4. Встановлено, що точність підтримання температури безпосередньо впливає на процес аустенітизації, формування мартенситу після гартування та структури відпущеного мартенситу після поліпшення. Перегрів спричиняє ріст аустенітного зерна, а недостатня температура – неповну аустенітизацію та погіршення властивостей.

5. Показано, що при коливаннях температури ± 10 °C спостерігається підвищений розкид твердості та механічних властивостей. Зменшення коливань

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до $\pm 1...2$ °C забезпечує стабільніше формування структури та кращу відтворюваність результатів термічної обробки.

6. Проведено аналіз методів автоматичного регулювання температури та встановлено, що для шахтної печі найбільш ефективним є PID-регулятор, який забезпечує плавне регулювання потужності нагрівачів, компенсацію теплової інерції та мінімальне перерегулювання.

7. Для реалізації системи автоматизації обрано контролер SIMATIC S7-1200 CPU1212C, модуль SM1231 TC, термопару типу K та операторську панель KTP700 Basic. Запропонована система забезпечує контроль температури, архівування параметрів та автоматичне керування процесом нагрівання.

8. Встановлено, що використання PID-регулятора дозволяє зменшити коливання температури в робочому просторі печі з ± 10 °C до $\pm 1...2$ °C, забезпечуючи стабільну аустенітизацію сталі 41Cr4 та формування однорідної структури після гартування і поліпшення.

9. Показано, що підвищення точності підтримання температури дозволяє зменшити розкид твердості після термічної обробки з 4...8 HRC до 1...2 HRC, підвищити стабільність механічних властивостей та знизити ймовірність браку.

10. У конструкторській частині запропоновано бак гартувальний та касету для подачі валів у гартувальний бак, що сприяє підвищенню рівня механізації технологічного процесу.

Практичною рекомендацією за результатами виконаної роботи є впровадження автоматизованої системи контролю температури шахтної печі на базі контролера SIMATIC S7-1200 із PID-регулюванням. Застосування такої системи дозволяє забезпечити високу точність підтримання температурних режимів термічної обробки сталі 41Cr4, отримати більш однорідну структуру відпущеного мартенситу після поліпшення, зменшити розкид механічних властивостей та підвищити довговічність валів циркуляційних пил під час експлуатації.

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).
2. ДСТУ ISO 148-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Частина 1. Метод випробування (ISO 148-1:2016, IDT).
3. ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквелом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT).
4. ДСТУ EN ISO 643:2022 Сталі. Мікрографічний метод визначення видимого розміру зерна (EN ISO 643:2020, IDT; ISO 643:2019, IDT).
5. Технологічне оснащення верстатів : конспект лекцій [Електронний ресурс] / уклад. А. О. Скоркін. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – (PDF 74 с.) <https://ekhnuir.karazin.ua/server/api/core/bitstreams/2bfbe419-860d-47e9-be59-65257d89db38/content>
6. Streblau M., Stavrev D., Aprahamian B., Shtarbakov V. Investigation of the Process of Hardening by Induction Heating of Steel Grade 40X (DIN 41Cr4): Numerical Modeling, Experimental Verification, Structural Changes // Scientific Proceedings of X International Congress "Machines, Technologies, Materials". 2013. P. 60 – 63.
7. Kajihara M. Numerical analysis for migration of austenite/ferrite interface during carburization of Fe // Journal of Materials Science. 2009. Vol. 44. P. 2109–2118.
8. Kun L., Nes C. S., Dumitru I., Faur N. Durability Study of a Machine Shaft Based on the Material Behavior of 41Cr4 Steel Subjected to Rotating Bending // Solid State Phenomena. 2012. Vol. 188. P. 256–261. DOI: 10.4028
9. Rudzinskas V., Daugėla V., Juchnevičius M., Kapustynskyi O. Study of Heat Treatment Processes for Crown Nuts // Research Review International Journal of

					<i>БР 6226.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Multidisciplinary. 2026. Vol. 11, No. 4. P. 296–301. DOI: 10.31305/rrijm.2026.v11.n04.032.

10. Shaker Z., Chiad J. S. Improvement the Mechanical Characteristics of Alloy Steel DIN 41Cr4 by Shot Peening // Journal of Engineering. 2020. Vol. 26, No. 7. P. 1–15. DOI: 10.31026/j.eng.2020.07.01.

11. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf

					БР 6226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		