

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

**Оптимізація технологічного процесу виготовлення  
привідного вала конічного одноступеневого редуктора з  
розробкою автоматизованого конвеєра/Optimization of  
the technological process for manufacturing the drive shaft  
of a single-stage bevel gearbox with the development of an  
automated conveyor.**

спеціальність 132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма матеріалознавство

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи \_\_\_\_\_

**СВИРІПА Вадим Валерійович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

**Фещук Юрій Петрович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

**Мельничук Микола Дмитрович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

Імбирович Н.Ю.

"~~14~~" вересня 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Сверіні Вадим Валерійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація технологічного процесу виготовлення привідного вала кошикового асинхронного редуктора з роторною автоматичною ковбескою  
керівник роботи к.т.н. доцент Фечук Ю.П.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "05" вересня 2025 року №282/1-02

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

3. Вихідні дані до роботи креслення деталі, базовий технологічний процес

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналітичний огляд і постановка задачі. Методика проведення випробувань. Розміщення частин; вибір зразків. Виготовлення металографічних шліфів. Вимірювання мікротвердості і глибини індукованого шару. Висновки з проведених досліджень. Технологічна частина. Конструювання, частини, дорожка графі. Висновки та практичні рекомендації.

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

1. Слайд 1 - Мета і завдання дослідження
2. Слайд 2 - Завдання асистентської роботи
3. Слайд 3 - Ескиз вала шестерні та редуктора
4. Слайд 4 - Рішення портування та відпуску сталі Ч1С24
5. Слайд 5 - Залашість твердості від температури відпуску. 6. Слайд 6 - Методика вимірювання сталі Ч1С24. 7. Слайд 7-9. Мікроструктура та мікротвердість за різних режимів ТО. 8. Слайд 10. Технологічний процес. 9. Слайд 11. Робота автоматичною ковбескою. 10. Слайд 12 - Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н.контр.	Мешковська С.В., доц.		

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Вступ. Розділ 1	20.10.2025р	визначено
2.	Розділ 2,3	15.11.2025р	визначено
3.	Розділ 4,5, Висновки та фінансові рекомендації	06.12.2025р	визначено

Здобувач вищої освіти

Сверіна В.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

Келлер О.Т.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Свиріпа В.В. Назва теми: Оптимізація технологічного процесу виготовлення привідного вала конічного одноступеневого редуктора з розробкою автоматизованого конвеєра. Рукопис.

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

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

В роботі з використанням мікроструктурних досліджень встановлено оптимальні параметри режиму термічної обробки серцевини валу та індукційного загартування визначених поверхонь. Здійснено автоматизацію технологічного процесу завантаження термічної печі.

Загальний обсяг роботи: 59 сторінок, 5 розділів, висновки та практичні рекомендації, 12 рисунків, 2 таблиці, 15 літературних джерел.

Ключові слова: термічна обробка, індукційне гартування, мікроструктура, міцнісні властивості, мова LAD.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 1725.00.000 ПЗ		
Розробив	Свиріпа				Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Фещук					3	59
Н. Контр	Мисковець				ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПММ-21		
Затв.	Імбірович						

## ABSTRACT

V. V. Svyripa. Title of the topic: Optimization of the technological process for manufacturing the drive shaft of a single-stage bevel gearbox with the development of an automated conveyor. Manuscript.

Master's qualification thesis of the EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, five chapters, conclusions and practical recommendations, a list of sources used, and appendices.

In the work using microstructural studies, the optimal parameters of the heat treatment mode of the shaft core and induction hardening of certain surfaces were established. The technological process of loading the thermal furnace was automated.

Total volume of work: 59 pages, 5 chapters, conclusions and practical recommendations, 12 figures, 2 tables, 15 references.

Keywords: heat treatment, induction hardening, microstructure, strength properties, LAD language.

					MP 2316.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ.....	9
1.1. Конічні одноступеневі редуктори: основні елементи, навантаження валів, режими роботи в мінітракторах.....	9
1.2. Конструкція привідного вала: роль шпонкових і шліцьових з'єднань, посадок під підшипники, концентратори напружень.....	10
1.3. Вимоги до валів: міцність, жорсткість, зносостійкість, точність і твердість після термічної обробки .....	12
1.4. Матеріали для валів редукторів.....	13
1.5. Сучасні підходи до оптимізації технології: маршрути, переналагодження, SMED, лінійне балансування, автоматизовані конвеєри, датчики, PLC/НМІ..	14
1.6. Постановка проблеми та цілі оптимізації.....	15
1.7. Мета роботи та основні завдання .....	20
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ .....	23
2.1. Відбір зразків .....	23
2.2. Виготовлення металографічних шліфів.....	23
2.3. Оптична металографія .....	24
2.4. Визначення мікротвердості і глибини індукційного шару .....	25
3. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	26
3.1. Дослідження механічних властивостей та мікроструктури після гартування та відпуску.....	26
3.2. Дослідження процесу індукційного гартування .....	32
3.3. Висновки з проведених досліджень .....	34
4. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	36
4.1. Технологічний процес виготовлення вала-шестерні зі сталі 41Cr4.....	36
5. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....	39
5.1. Конструювання основних елементів конічного редуктора .....	39

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

5.2. Розробкою автоматизованого конвеєра .....	41
5.3. Засоби автоматизації (структура керування) .....	43
5.4. Послідовність роботи завантажувального конвеєра .....	44
5.5. Автоматизація конвеєра завантаження печі .....	45
5.6. Охорона праці та навколишнього середовища .....	51
ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	58
ДОДАТКИ	

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## ВСТУП

Сучасний стан машинобудівного виробництва характеризується високим рівнем конкуренції, значними вимогами до якості, точності виготовлення та продуктивності виробництва, а також тенденцією до переходу на цифрові та автоматизовані технології. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності механоскладального виробництва є оптимізація технологічних процесів виготовлення деталей, що визначають надійність та довговічність виробів. До таких деталей належать вали приводів редукторів, які працюють у складних умовах навантаження, мають підвищені вимоги до міцності, точності посадок і стабільності геометрії після термічної обробки.

Редуктори кінцевого типу широко застосовуються у трансмісійних системах малогабаритних тракторів, верстатів, підйомно-транспортних машин, промислових маніпуляторів та іншого технологічного обладнання. Привідний вал у таких редукторах передає крутний момент від двигуна до шестерень і зазнає дії змінних згинальних і крутних навантажень. Саме тому від правильного вибору матеріалу, режимів термообробки та раціональної технології виготовлення залежить не лише надійність роботи редуктора, а й ефективність усього агрегату.

В умовах сучасного машинобудування спостерігається тенденція до автоматизації технологічних ліній, зокрема з використанням транспортно-завантажувальних систем, роботизованих маніпуляторів і конвеєрів. Впровадження автоматизованих конвеєрів у механоскладальних цехах дає можливість зменшити час міжопераційних переміщень, стабілізувати такт виробництва, знизити трудомісткість і собівартість виготовлення деталей. Таким чином, питання оптимізації технологічного процесу виготовлення привідного вала з одночасною розробкою автоматизованого конвеєра є технічно та економічно доцільним і відповідає сучасним тенденціям розвитку промисловості у межах концепції Індустрія 4.0.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Особливу увагу в процесі виготовлення валів слід приділяти вибору матеріалу. Традиційно в Україні для таких деталей використовували конструкційну леговану сталь 40X (ГОСТ 4543-71), яка після гартування та відпуску забезпечує твердість 28–35 HRC і забезпечує міцність понад 900 МПа. Проте сучасні вимоги уніфікації виробництва з європейськими стандартами передбачають перехід на аналоги за EN 10083. У даній роботі передбачається застосування сталі 41Cr4 (1.7035), що є європейським аналогом 40X і забезпечує подібні механічні властивості після термічної обробки. Використання наведеного матеріалу полегшує міжнародну сертифікацію продукції та забезпечує відповідність європейським вимогам до технологічної сталі для деталей, які працюють під високими навантаженнями.

Наявні технологічні маршрути виготовлення валів у серійному виробництві часто сформовані емпірично, без урахування сучасних принципів оптимізації часу обробки, використання ЧПК-устаткування та автоматизованих систем транспортування. Це призводить до збільшення кількості переналагоджень, переустановок і простоїв, що негативно впливає на продуктивність лінії. Відповідно, актуальним є завдання розроблення оптимізованого технологічного процесу з мінімізацією кількості установок, вибором найбільш ефективних режимів різання, впровадженням автоматизованої транспортної системи та цифрового моніторингу параметрів виготовлення.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1.1. Конічні одноступеневі редуктори: основні елементи, навантаження валів, режими роботи в мінітракторах

Конічні редуктори є важливими вузлами передавання обертального моменту між валами, що перетинаються під певним кутом, найчастіше –  $90^\circ$ . Вони застосовуються у приводах машин, де необхідно змінити напрямок обертання або забезпечити пониження частоти обертання при одночасному збільшенні крутного моменту. Конічні одноступеневі редуктори завдяки компактності та простоті конструкції набули широкого використання у сільськогосподарській техніці, зокрема в мінітракторах і мототехніці (рисунок 1.1).

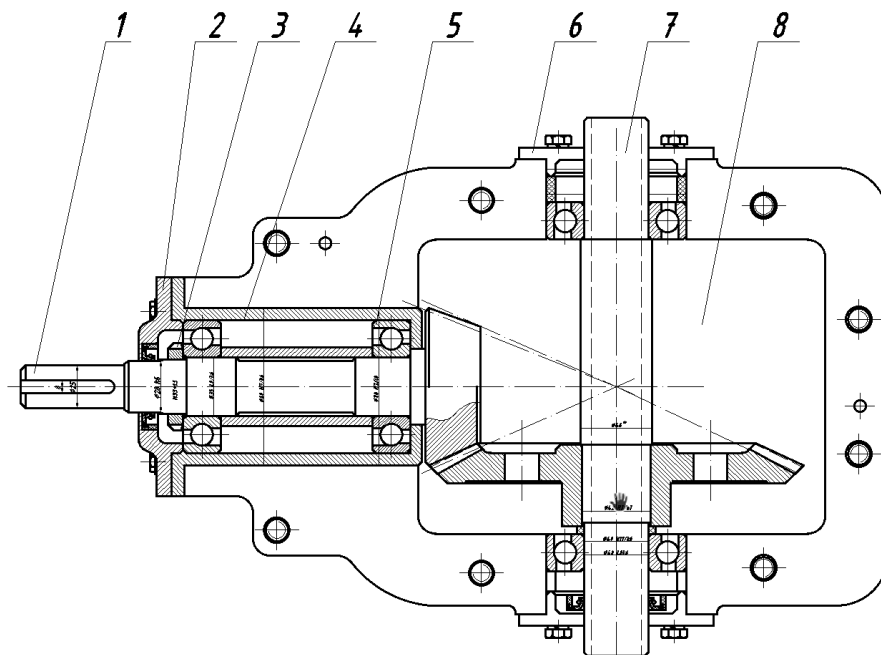


Рисунок 1.1 – Схема конічного редуктора:

1 – привідний вал-шестерня; 2– кришка швидкохідного валу; 3 – гайка регульовальна; 4 – стакан; 5 – підшипник; 6 – кришка тихохідного валу; 7 – кришка тихохідного валу; корпус редуктора.

						Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МР 1725.00.000 ПЗ	

Основними елементами кінцевого редуктора є ведучий (привідний) вал із кінцевою шестернею, ведений вал, корпус, підшипникові опори та система мащення. Привідний вал зазнає комбінованих навантажень: крутильних, осьових і радіальних. У процесі роботи редуктора вал сприймає ударні навантаження, коливання моменту, а також температурні впливи, що потребує високої міцності, жорсткості та стабільності розмірів після термічної обробки.

У мінітракторах редуктори працюють у режимах середньої та підвищеної змінності, часто при нерівномірних навантаженнях, що виникають через неоднорідність ґрунту або зміну крутного моменту двигуна. Це накладає особливі вимоги до деталей трансмісії: вони повинні витримувати циклічні навантаження без втрати геометричної точності, а також мати достатній запас міцності на втому. Тривалість безвідмовної роботи редуктора в значній мірі визначається якістю виготовлення саме привідного вала, тому оптимізація технології його виробництва є актуальним завданням сучасного машинобудування.

1.2. Конструкція привідного вала: роль шпонкових і шліцьових з'єднань, посадок під підшипники, концентратори напружень

Привідний вал є деталлю обертання з декількома шийками, посадочними поверхнями під підшипники, отворами або пазами під шпонкові чи шліцьові з'єднання. На одному кінці вала зазвичай закріплюється кінчне зубчасте колесо, на іншому – з'єднання із джерелом обертання (зчеплення або муфта). Для передавання крутного моменту використовуються шпонкові або шліцьові з'єднання, які забезпечують надійне зчеплення без ковзання. Шпонкові з'єднання прості у виготовленні та обслуговуванні, але менш довговічні при змінних навантаженнях (рисунки 1.2).

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

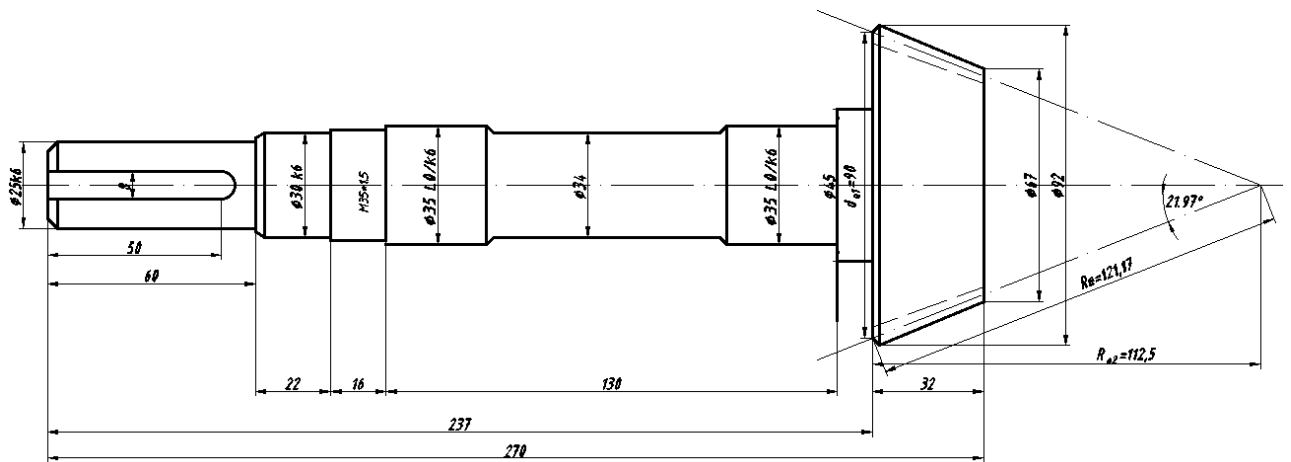


Рисунок 1.2 – Ескіз привідного вала-шестерні

Шліцьові з'єднання мають вищу несучу здатність, забезпечують точніше центрування та дозволяють передавати більші моменти при компактних габаритах (шліцьові з'єднання передбачені в середині пустотілого тихохідного вала, зображеного на рисунку 1.2).

Посадки під підшипники є найвідповідальнішими ділянками вала, оскільки саме тут концентруються основні динамічні навантаження. Від точності обробки цих поверхонь залежить робота всього редуктора. Типові посадки для підшипників кочення – перехідні або натягнуті (H6/k6), з мінімальним радіальним биттям (не більше 0,01...0,02 мм) і шорсткістю

$$Ra \leq 0,8 \text{ мкм.}$$

Особливу увагу під час проектування приділяють усуненню концентраторів напружень – різких переходів діаметрів, гострих канавок, отворів під шпонки тощо. Конструктивні переходи виконують із плавними радіусами ( $R = 1...3$  мм), а поверхні, що контактують із підшипниками або шестернями, додатково полірують. Для зниження ризику втомного руйнування застосовують фінішну обробку (шліфування, роликве накочування), що підвищує мікротвердість поверхневого шару та зменшує залишкові напруження розтягнення.

									Арк.
									11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 1725.00.000 ПЗ				

### 1.3. Вимоги до валів: міцність, жорсткість, зносостійкість, точність і твердість після термічної обробки

Експлуатаційні вимоги до приводних валів визначаються комбінованими крутильними та вигинними навантаженнями; конструкція й технологія мають забезпечити запас міцності на втому й достатню жорсткість, щоби обмежити прогини та вібрації. Узагальнені методики розрахунків міцності валів і вплив геометричних концентраторів викладено в базових інженерних посібниках і довідниках з елементів машин, що встановлюють практичні орієнтири для допусків, жорсткості та шорсткості робочих шийок [1].

Вимоги до посадочних поверхонь під підшипники кочення включають класи точності полів допусків (типово IT6...IT7 для валів під роликові/кулькові опори), контроль концентричності на рівні сотих часток міліметра та шорсткість  $R_a \approx 0.4...0.8$  мкм після шліфування – ці показники узгоджуються зі стандартами лінійних розмірів і посадок (ISO 286-1) та правилами індикації поверхневих текстур (ISO 1302) для коректної інтерпретації на кресленнях і в технічній документації [2].

Надійність підшипникових вузлів і довговічність шийок суттєво залежать від точності посадок, радіального биття й параметрів шорсткості; рекомендації щодо вибору посадок, полів натягів/зазорів і впливу умов навантаження на ресурс підшипників подано в підручниках і монографіях з підшипників (зокрема, Harris & Kotzalas, Rolling Bearing Analysis) [3].

Для забезпечення зносостійкості та втомної міцності використовується гартування з відпуском або локальне індукційне зміцнення; типові діапазони твердості для загартовано-відпущених валів становлять близько 28...35 HRC з урахуванням балансу міцності/в'язкості, що відповідає рекомендаціям довідників ASM Handbook і посібників з термообробки сталей [4...7].

Фінішні методи (круглошліфування, кероване формування поверхневої текстури) впливають на поверхневу міцність і залишкові напруження;

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

практичні орієнтири щодо режимів шліфування, теплових ефектів та запобігання «жженню» наведені у класичній монографії Malkin & Guo, Grinding Technology [5].

#### 1.4. Матеріали для валів редукторів

Для валів редукторів доцільні середньовуглецеві леговані сталі з хромом/марганцем, що забезпечують після ТМО необхідні міцність, гартівність і стабільність розмірів. Європейським аналогом широко відомої сталі 40X є 41Cr4 (1.7035) за EN 10083-3; стандарт описує склад, постачання та властивості в стані загартування й відпуску. Хімічний склад сталі 41Cr4: C  $\approx$  0.38...0.45 %, Cr  $\approx$  0.90...1.20 % (дані заносимо в таблицю 1.1) і типові режими ТМО забезпечують міцність близько 900...1100 МПа та потрібну в'язкість для валів [6].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 41Cr4 (1.7035) за EN 10083-3

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,38 ... 0,45	max 0,4	0,6 ... 0,9	max 0,025	max 0,035	0,9 ... 1,2

Практичні таблиці та методичні вказівки щодо вибору режимів гартування /відпуску для легованих хромом сталей, а також впливу вмісту Cr на гартівність, карбідоутворення та зносостійкість наведено у виданнях ASM International і у фахових посібниках із термообробки сталей. Це підтверджує придатність 41Cr4 для валів із підвищеними вимогами до зносостійкості шийок і втомної міцності [7,8]. Також поширення набули сталі 45 та 38ХНА. Сталь 45 застосовують для валів деревообробного обладнання та мало відповідальних валів. Термічна обробка – поліпшення. Цементівна хромонікельалюмінієва сталь 38ХНА застосовують для виготовлення відповідальних валів, які працюють під високими контактними та змінними навантаженнями і вимагають твердої зносостійкої поверхні при в'язкій серцевині.

Для коректного оформлення креслень і технічних вимог до поверхонь валів використовують міжнародні стандарти: ISO 286-1 (система допусків і посадок) та ISO 1302 (позначення параметрів поверхневого рельєфу). Це забезпечує уніфіковане трактування полів допусків (наприклад, H6/k6 для посадок під підшипники) і параметрів шорсткості під час міжвідомчої взаємодії [2].

З'єднання для передавання крутного моменту – паралельні шпонки (DIN 6885) або евольвентні шліци (DIN 5480) – вибирають з огляду на переданий момент, компактність і вимоги до центрування; довідкові діапазони модулів/кутів тиску для DIN 5480 та типоряди шпонок за DIN 6885 надають стандартизований дизайн-простір і дозволяють уніфікувати інструмент-контроль [9, 10]. В роботі приймаємо сталь 41Cr4.

1.5. Сучасні підходи до оптимізації технології: маршрути, переналагодження, SMED, лінійне балансування, автоматизовані конвеєри, датчики, PLC/HMI

Оптимізація технологічних процесів виготовлення валів включає зменшення кількості установок, уніфікацію базування, інтеграцію переходів на ЧПК та скорочення допоміжного часу. Методологія SMED (Shigeo Shingo) націлена на переведення максимальної частки операцій наладки у «зовнішні» та систематичне усунення втрат часу – фундаментальні принципи й практичні кейси впровадження наведені в оригінальній монографії [11...13].

Концепція Toyota Production System (Taiichi Ohno) забезпечує каркас для поточного виробництва, унеможливаючи надмірні запаси й простої; поєднання Just-in-Time і Jidoka формує основу для раціоналізації потоків і синхронізації такту.

Оцінювання ефективності виробничої системи здійснюють через OEE, яке історично закріплене в рамках TPM (Seiichi Nakajima); це підґрунтя для

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

пріоритетизації втрат та оцінки впливу автоматизації транспорту/контролю на випуск [13].

Фінішні операції (шліфування) й контроль поверхонь визначають стабільність процесу та ресурс валів; докладні практичні рекомендації щодо вибору абразивів, теплових режимів і запобігання термічним пошкодженням систематизовано у Malkin & Guo [5].

Для підшипникових вузлів і балансування валів/роторів використовують настанови з проєктування підшипників і стандарти балансування ротуючих деталей; застосування вимог ISO 21940 забезпечує коректні критерії залишкового дисбалансу та випробування балансувальних машин [14].

Інтеграція автоматизованих транспортних систем (палетні/роликові конвеєри) із PLC/HMI – ключовий елемент скорочення міжопераційних переміщень і стабілізації такту. Технічні можливості та типові архітектури на базі Siemens SIMATIC S7-1200 (PROFINET, TIA Portal) і SIMATIC HMI Basic/Unified Panels наведено в офіційних керівництвах користувача, що слугують нормативно-методичною базою для промислового впровадження [15].

## 1.6. Постановка проблеми та цілі оптимізації

У сучасних умовах розвитку машинобудівного виробництва ефективність підприємства визначається не лише якістю виготовлених деталей, а й швидкістю реакції виробничої системи на зміни попиту, стабільністю технологічних процесів і рівнем автоматизації. Традиційні технологічні схеми, які склалися ще у серійному та дрібносерійному виробництві, часто не відповідають сучасним вимогам до гнучкості, точності та економічності. У більшості випадків виробничі маршрути залишаються статичними, а транспорт між операціями здійснюється вручну або напівавтоматично, що збільшує тривалість циклу та підвищує ризик браку.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Особливо гостро ці недоліки проявляються у виготовленні деталей типу «вал», до яких належить привідний вал конічного одноступеневого редуктора. Ця деталь має складну геометрію, вимагає високої точності взаємного розташування поверхонь, дрібних допусків на концентричність і шорсткість. Водночас, процес її виготовлення охоплює низку технологічних операцій, виконуваних на різних верстатах: токарних, фрезерних, шліфувальних, термічних. У більшості підприємств послідовність обробки залишається традиційною, із великою кількістю ручних переміщень і контролю. Це створює умови для нераціонального використання часу та ресурсів.

#### 1.6.1. Виявлення проблемних місць існуючого процесу

Проведений аналіз існуючих технологічних процесів виготовлення валів подібного типу показує наявність низки типових вузьких місць, які знижують продуктивність і якість виробництва:

- надмірна кількість установок. Для повного циклу обробки привідного вала виконується 6...8 установок на різних верстатах. При цьому кожна переустановка збільшує похибку базування і сумарну похибку форми та взаємного розташування поверхонь;

- ручне транспортування деталей між операціями. У більшості випадків переміщення заготовок здійснюється оператором, що призводить до простоїв, травмонебезпеки, неузгодженості такту й нерівномірності потоку;

- нерівномірне завантаження обладнання. Через різну тривалість операцій частина верстатів простоює, інші – перевантажені. Це спричиняє дисбаланс виробничої лінії, збільшує запаси напівфабрикатів і знижує ефективність використання площі;

- відсутність централізованого моніторингу процесу. Більшість дій оператора не фіксуються автоматично, відсутня система збору даних про фактичний час виконання операцій, аварійні зупинки чи затримки;

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

– застарілі схеми базування. Часто використовуються універсальні патрони або центри без спеціалізованих пристроїв, що збільшує допоміжний час на налагодження і підвищує похибки;

– невідповідність системи контролю сучасним вимогам. Контроль виконується після завершення обробки або вибірково, що не дозволяє оперативно реагувати на відхилення в процесі;

– низька інтегрованість транспортних та обробних систем. Конвеєри або подавачі, якщо й наявні, працюють автономно, без зворотного зв'язку із системою керування верстатами.

Такі недоліки призводять до збільшення тривалості виробничого циклу в середньому на 20...30 % у порівнянні з оптимальним рівнем, підвищення собівартості виготовлення деталі, а також нестабільності якості через накопичення похибок і людський фактор.

#### 1.6.2. Необхідність оптимізації технологічного процесу

Оптимізація процесу виготовлення привідного вала повинна бути спрямована на комплексне вдосконалення технологічної та організаційної складових. Традиційне підвищення точності верстатів або застосування нових інструментів без зміни логіки процесу не дає істотного ефекту. Потрібно розглядати виробничий процес як єдину систему, у якій обробка, транспортування, контроль і управління з'єднані в єдиний інформаційно-технологічний потік.

Основними напрямками оптимізації є:

– скорочення кількості установок шляхом об'єднання кількох операцій на одному ЧПК-верстаті або використання комбінованих інструментів;

– раціоналізація маршруту обробки привідного вала мінітрактора, виключення дублювання переходів, застосування попереднього та фінішного базування по одній системі координат;

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

– застосування автоматизованої транспортної системи у вигляді палетного або роликового конвеєра для передачі деталей між позиціями без участі оператора;

– інтеграція системи керування на базі програмованого логічного контролера (PLC) типу Siemens SIMATIC S7 із HMI-панеллю для моніторингу стану процесу, візуалізації такту лінії, контролю аварійних зупинок і журналювання параметрів (запису журналів);

– балансування лінії – вирівнювання тривалості основних операцій, щоб мінімізувати простої та забезпечити безперервність потоку;

– покращення умов праці завдяки виключенню ручних переміщень, автоматичному керуванню подачею деталей і підвищенню рівня безпеки.

Впровадження таких рішень дозволить створити автоматизовану технологічну лінію, у якій усі елементи – від верстатів і конвеєра до системи контролю якості – функціонують синхронно. Це відповідає сучасним принципам побудови «розумних виробництв» (Smart Factory) у межах концепції Індустрія 4.0, де ключову роль відіграє взаємозв'язок між фізичними процесами та цифровими системами управління.

### 1.6.3. Цілі та завдання оптимізації

Мета оптимізації полягає у створенні ефективного, стабільного та безпечного технологічного процесу виготовлення привідного вала, який забезпечує мінімальні втрати часу, високу якість продукції та можливість гнучкої адаптації до зміни обсягів виробництва.

Для досягнення цієї мети визначено низку основних цілей оптимізації та їх послідовність:

1. Зниження тривалості технологічного циклу – скорочення сумарного часу обробки за рахунок усунення зайвих операцій, оптимізації режимів різання, зменшення переналагоджень і впровадження автоматизованого транспортування.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2. Підвищення точності та стабільності параметрів деталі – зменшення похибок базування та биття, підвищення повторюваності обробки завдяки об'єднанню переходів і застосуванню ЧПК.

3. Скорочення собівартості виробництва – зниження витрат на ручну працю, допоміжний час і переміщення деталей; раціональне використання енергії та інструменту.

4. Підвищення рівня безпеки та ергономіки – мінімізація контактів оператора з рухомими деталями, автоматичний контроль аварійних ситуацій, сигналізація небезпечних зон.

5. Підвищення ефективності використання обладнання – зростання коефіцієнта завантаження верстатів і зменшення простоїв; підвищення інтегрального показника OEE (Overall Equipment Effectiveness) не менше ніж на 15...20 %.

6. Створення основи для подальшої цифрової інтеграції – можливість підключення системи моніторингу виробничих параметрів, аналітики та діагностики стану обладнання.

Для досягнення зазначених цілей у межах даної бакалаврської роботи ставляться такі завдання дослідження:

- виконати аналіз конструкції привідного вала та його умов роботи в кіничному редукторі;
- оцінити технологічність конструкції та розробити раціональний технологічний маршрут;
- вибрати оптимальний матеріал і режими термічної обробки для забезпечення необхідної міцності та зносостійкості;
- провести розрахунки режимів різання та часу на основних операціях;
- спроектувати автоматизований конвеєр для транспортування валів між операціями, розрахувати параметри приводу, швидкість руху та такт подачі;
- розробити алгоритм керування конвеєром на базі PLC Siemens S7 із системою НМІ-візуалізації;

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

–виконати економічну оцінку ефективності впровадження розроблених заходів та порівняти отримані показники з існуючими;

–запропонувати заходи з охорони праці та безпеки під час експлуатації автоматизованої лінії.

#### 1.6.4 Очікувані результати

У результаті реалізації оптимізованої технологічної схеми очікується:

– зменшення загального циклу виготовлення вала на 20...25 %;

– зниження кількості операційних установок із 6...8 до 3...4;

– підвищення точності геометричних параметрів до рівня IT6 і шорсткості  $Ra \leq 0,8$  мкм;

– зменшення ручної праці на 40...50 % за рахунок автоматизованого транспорту;

– збільшення коефіцієнта завантаження обладнання (OEE) із середнього 0,60 до 0,75...0,80;

– зниження собівартості одиниці продукції на 10...15 %.

Таким чином, оптимізація технологічного процесу виготовлення привідного вала з інтеграцією автоматизованого конвеєра забезпечує не лише технічне вдосконалення виробництва, а й комплексний економічний ефект. Реалізація цих рішень дозволить підвищити конкурентоспроможність підприємства, поліпшити якість та стабільність випуску продукції, а також створить передумови для впровадження цифрових систем керування виробництвом у майбутньому.

#### 1.7. Мета роботи та основні завдання

Мета роботи – підвищення ефективності виробництва привідного вала конічного одноступеневого редуктора шляхом оптимізації технологічного процесу та розроблення автоматизованого конвеєра подачі заготовок.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

- виконати аналіз конструкції привідного вала, умов його експлуатації та вимог до точності, шорсткості та твердості поверхонь;
- обґрунтувати вибір матеріалу (сталь 41Cr4) та визначити оптимальні режими термічної обробки;
- розробити базовий технологічний маршрут виготовлення вала;
- розробити технічну концепцію автоматизованого конвеєра, що забезпечує транспортування валів між технологічними позиціями, з визначенням параметрів приводу, датчиків, системи керування на базі Siemens SIMATIC S7.
- розробити заходи з охорони праці, пожежної безпеки та екологічної безпечності під час експлуатації автоматизованої лінії.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення привідного вала конічного одноступеневого редуктора.

Предметом дослідження – методи оптимізації процесу обробки заготовки в процесі виробництва та системи автоматизації транспортно-завантажувальних операцій.

Методи дослідження ґрунтуються на інженерних розрахунках, аналізі технологічності конструкції, використанні методів системного підходу до оптимізації технологічних маршрутів, а також на моделюванні параметрів автоматизованого конвеєра. При розрахунках застосовуються положення стандартів EN, ISO та DIN, довідкові матеріали з технології машинобудування, принципи розрахунку часу обробки та елементів транспортних систем.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні технологічної оптимізації процесу виготовлення деталі з розробленням концепції автоматизованого конвеєра для її подачі між операціями, що дозволяє розглядати процес як єдину інтегровану виробничу систему. Запропонований підхід забезпечує узгодження

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

технологічного маршруту, параметрів механічної обробки та логістики деталей у потоці.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості безпосереднього використання розроблених рішень у виробничих умовах. Оптимізований процес виготовлення дозволить зменшити трудомісткість на 10...15 %, скоротити час виготовлення однієї деталі, знизити собівартість і підвищити рівень автоматизації цеху. Автоматизований конвеєр забезпечить стабільний такт подачі заготовок, синхронізацію з ЧПК-верстатами, підвищення рівня безпеки праці та покращення організації виробництва.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

#### 2.1. Відбір зразків

##### 2.1.1. Відбір зразків після поліпшення (Q&T)

Відібрати поперечні шліфи:

- із зони шийки вала  $\varnothing 25$  (біля шпонкового паза; небезпечний переріз) – структура основи та її однорідність;
- із зони шийки вала  $\varnothing 35$  (під підшипник) – базовий стан до індукційного нагріву;
- із зубчатого вінця (тіло шестерні) – контроль наявності перегріву, характеру зерен, неоднорідності структури.

##### 2.1.2. Відбір зразків після індукційного гартування

Окремо зробити шліфи:

по профілю зуба (мінімум 2 напрямки):

- переріз через центр зуба (де контакт) – для оцінки товщини шару;
- переріз через корінь зуба (зона згину) – для оцінки ризику наявності тріщин чи перегріву;
- по шийці вала  $\varnothing 35$  (поперечний шліф) – для оцінки глибини індукційного шару;

#### 2.2. Виготовлення металографічних шліфів

##### 2.2.1. Вирізання зразків

Вирізання з інтенсивним охолодженням, щоб не перегріти край шпонкового паза, а особливо індукційний шар.

##### 2.2.2. Закріплення (mounting) зразків

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Розрізняють холодне (епоксидне) та гаряче пресування.

Для індукційних шарів дуже зручно закріплювати зразки епоксидною, щоб не “зірвати” край.

### 2.2.3. Шліфування

Типовий ряд: P240 → P400 → P600 → P800 → P1200.

Важливо: не “перетиснути” тонкий поверхневий шар.

### 2.2.4. Полірування

Полірування проводимо алмазною пастою з розміром часток:

7 μm алмаз → 3 μm алмаз → 1 μm алмаз.

Край індукційного шару полірувати м’яко, мінімальний тиск.

### 2.2.5. Травлення

Основний реактив для 41Cr4 – Ніталь. Її склад: 2...4% (HNO<sub>3</sub> у спирті), 3...15 с (підбирається експериментально).

## 2.3. Оптична металографія

Оптична металографія застосовуємо для зразків після гартування та високоговідпуку (поліпшення) та після індукційного гартування

### 2.3.1. Оптична металографія після поліпшення

Оптичну металографію після поліпшення застосовуємо для підтвердження структури відпущеного мартенситу і відсутності небажаних структур.

Фотографування здійснюємо при збільшеннях: ×100 (загальний вигляд), ×200, ×500 (деталі карбідної дисперсії).

На фотографіях перевіряємо неоднорідність структури по перерізу Ø25 мм та Ø35 мм (чи немає “м’якої” зони), можливі зони декарбурації (зневуглецюванн).

### 2.3.2. Оптична металографія після індукційного гартування

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Оптичну металографію після індукційного гартування проводять для показу “градієнту”: зміцнений шар → перехідна ділянка → серцевина (ядро).

Фотографування здійснюємо при збільшеннях:  $\times 50 \dots \times 100$  – загальний переріз із видимою межею шару,  $\times 200 \dots \times 500$  – поверхневий шар (мартенсит),  $\times 200 \dots \times 500$  – перехідна зона (змішана структура),  $\times 200$ : серцевина (відпущений мартенсит після поліпшення).

## 2.4. Визначення мікротвердості і глибини індукційного шару

### 2.4.1. Суть методу.

Виконати профіль мікротвердості HV0.1 або HV0.2 від поверхні до серцевини: крок 0.1...0.2 мм у межах першого 1...2 мм, далі крок 0.3...0.5 мм до стабілізації на рівні ядра.

### 2.4.2. Визначати “ефективну глибину шару”.

“Ефективна глибина” – до рівня, де твердість падає до порогу, узгодженого з вимогами (наприклад, HRC близько 50 або відповідний HV-поріг), або до точки, де твердість стає близькою до твердості серцевини плюс невелика надбавка.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження механічних властивостей та мікроструктури після гартування та відпуску

Дослідження механічних властивостей та мікроструктури після гартування та відпуску проводили шляхом нагріву заготовки зі сталі 41Cr4 до температури близько 850 °С, витримці протягом 30 хвилин з наступним гартуванням в середовищі полімерного гартівного розчину PAG-тип (поліалкіленгліколь) у воді з концентрацією 10...12 %. Відпуск проводили при температурах 200, 300, 400, 500, 600 °С.

Режими гартування та відпуску наведені на рисунку 3.1.

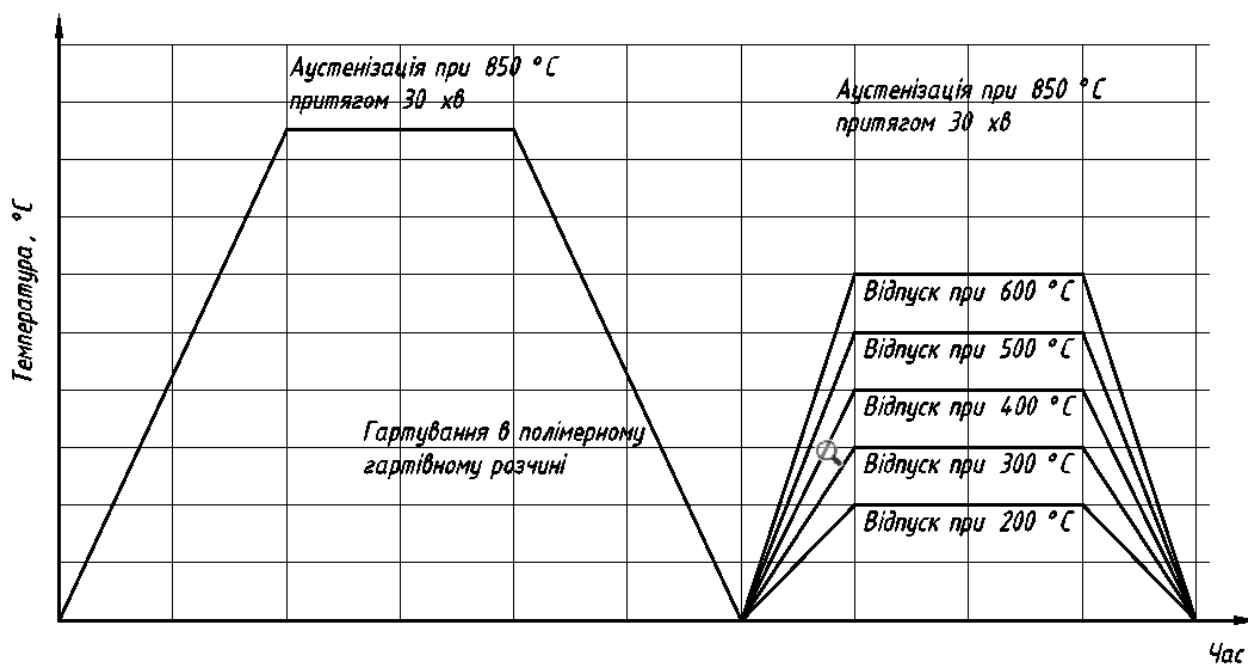


Рисунок 3.1 – Режими гартування та відпуску сталі 41Cr4 в поліалкіленгліколі.

					МП 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Результати вимірювання середньої величини твердості наведено на рисунку 3.2.

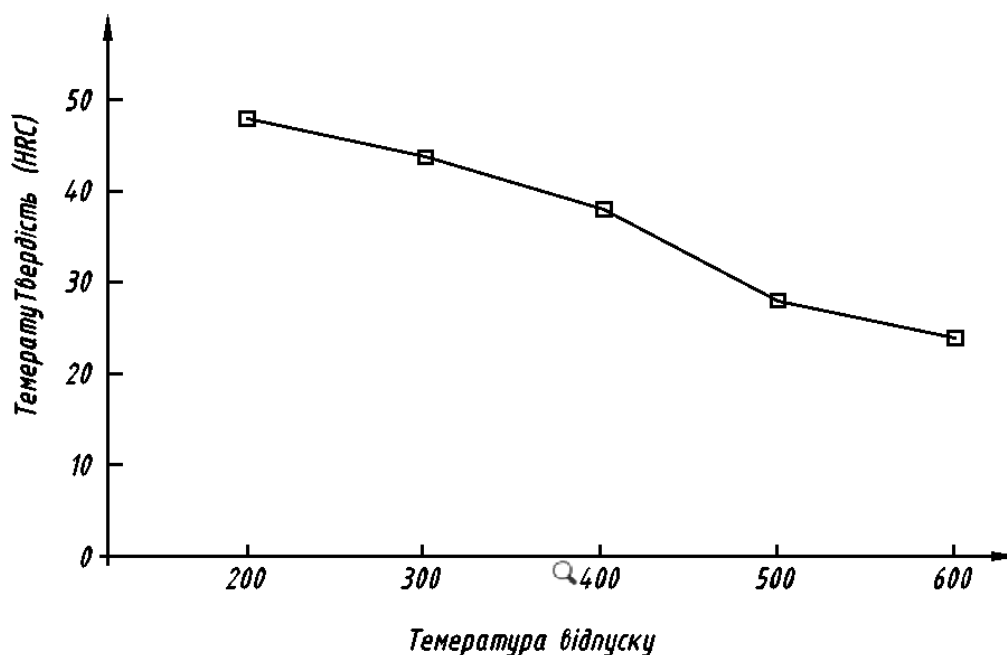


Рисунок 3.2 – графік залежності твердості сталі 41Cr4 після гартування в поліалкіленгліколі та витримці за температур 200, 300, 400, 500, 600 °C

Видно, що твердість сталі 41Cr4 поступово зменшується з 48 HRC до 24 HRC зі збільшенням температури відпуску в діапазоні 200...600 °C; виявлено, що швидкість зниження твердості за Роквелом у нижчому діапазоні температур відпуску 200...400°C вища, ніж у діапазонах температур 400...500°C та 500...600°C. Було помічено, що різні процеси термічної обробки дають різну твердість. Твердість поступово зменшується в діапазонах 200...400°C та 500...600°C, але від 400 до 500°C твердість різко знижується приблизно на 10 HRC. Це можна пояснити фазовим перетворенням сталі під час процесу гартування, утворенням мартенситу після відпуску, зменшенням щільності дислокацій та укрупненням перехідних карбідів.

Відомо про вплив залишкового аустеніту та зменшення густини дислокацій і укрупнення перехідних карбідів на зниження твердості. Цей матеріал має мартенситну структуру, що поєднує бейніт, і він є крихким після гартування. Вуглець, що переходить для цих двох фаз, є основним фактором,

що контролює всі мікроструктурні перетворення досліджуваної сталі. Додаткові елементи, такі як Cr та Mn, також відомо, що сприяють утворенню бейніту під час безперервного охолодження. Зі збільшенням вмісту Mn та Cr товщина пластини бейнітного фериту зменшується, а об'ємна частка залишкового аустеніту збільшується. Бейніт також може утворюватися в результаті розкладання аустеніту під час гартування, спостерігається невелика зміна твердості при низьких температурах відпуску між 200...300 °C. Можна пояснити, що зниження твердості може бути пов'язане з розм'якшувальним ефектом твердого мартенситу та перекристалізацією більшої кількості фериту під час відпуску.

Властивості сталі 41Cr4 при випробуваннях на розтяг

Значення властивостей сталі DIN 41Cr4 на розтяг показано на рисунку 3.3. Існує три стадії межі текучості ( $\sigma_S$  або YS) та межі міцності на розтяг ( $\sigma_B$  або UTS) як функції температури відпуску.

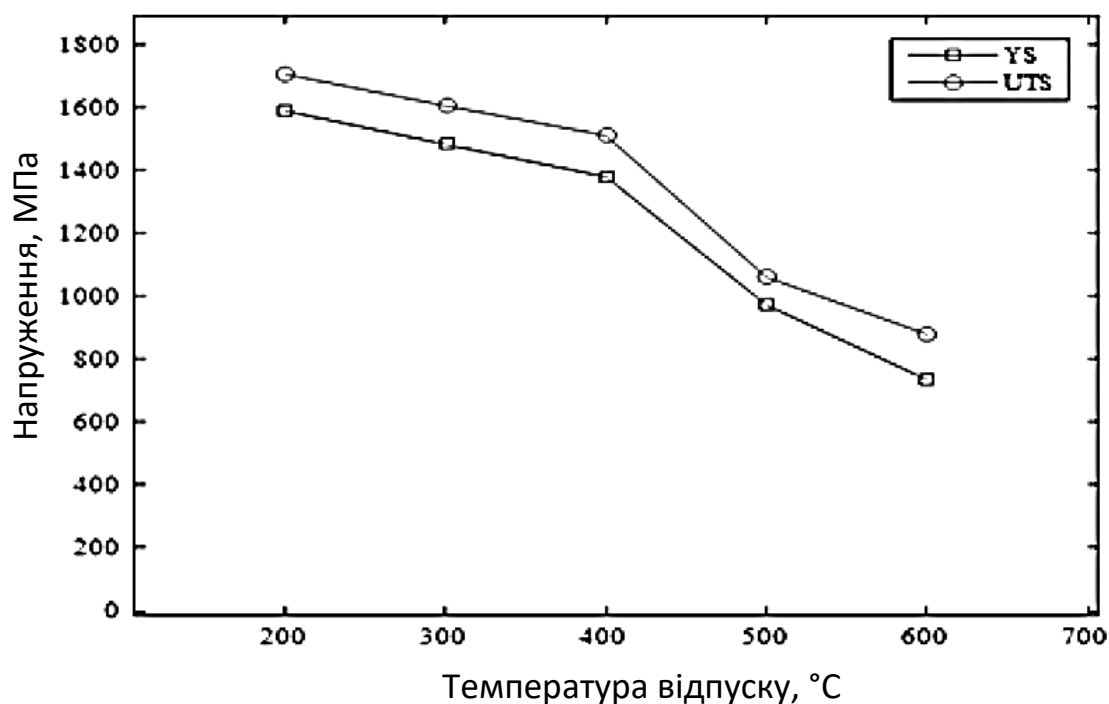


Рисунок 3.3 – Залежність межі текучості та межі міцності сталі 41Cr4 від температури відпуску

Зі збільшенням температури відпуску до 400 °C YS та UTS дещо зменшуються приблизно на 100 МПа.

Від 400 до 500°C YS та UTS різко зменшуються з 1377 до 970,6 МПа для YS та з 1509 до 1061 МПа для UTS.

Від 500 до 600°C YS та UTS поступово зменшуються приблизно на 200 МПа.

Зі збільшенням температури відпуску концентрація вуглецю в матриці відпущеного мартенситу зменшується через дифузію атомів вуглецю в цементит. Отже, міцність відпущеного мартенситу зменшується, а його пластичність збільшується. Як наслідок, чим вища температура відпуску, тим нижча щільність дислокацій і тим нижча швидкість зміцнення.

З рисунка 3.3 також видно, що явище окрихчення відпущеного мартенситу не має значного впливу на міцність на розтяг сталі 41Cr4.

Вплив режимів термічної обробки на властивості сталі 41Cr4 заносимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Механічні властивості сталі 41Cr4 за різних режимів термічної обробки

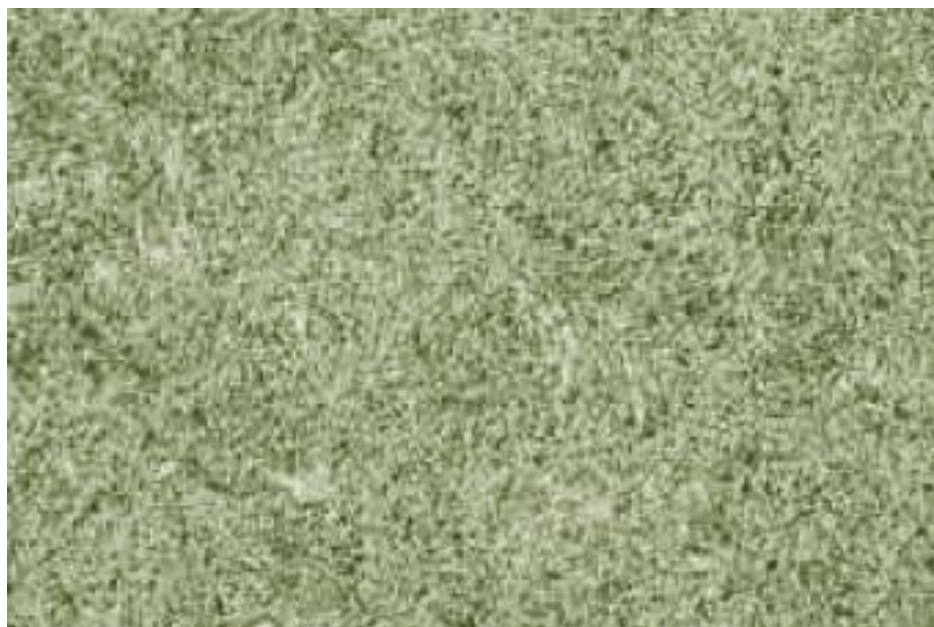
Термічна обробка	Межа текучості, YS [МПа]	Межа міцності, UTS [МПа]	Відносне видовження, $\delta$ [%]	Ударна в'язкість Kv [J]	В'язкість руйнування K <sub>ic</sub> [МПа $\sqrt{м}$ ]	HRC
Гартування з 850°C, відпуск при 200°C	1586.11	1703.08	2.35	9.51	5.52	48
Гартування з 850°C, відпуск при 300°C	1480.10	1603.13	3.67	10.33	6.07	44
Гартування з 850°C, відпуск при 400°C	1377.02	1509.10	4.04	17.02	10.39	38
Гартування з 850°C, відпуск при 500°C	970.16	1061.03	8.05	99.33	63.24	28
Гартування з 850°C, відпуск при 600°C	773.18	880.05	9.66	118.66	75.69	24

Мікроструктурний аналіз зразків показано на рисунку 3.4.

На рисунку 3.4, а видно, що мікроструктура складається з мартенситу (М) та характеризується дрібноголчатою будовою. Мікроструктура зразка, відпущеного при 200 °C (рисунок 3.4, б), складається з рейкового мартенситу,

						Арк.
					MP 1725.00.000 ПЗ	29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

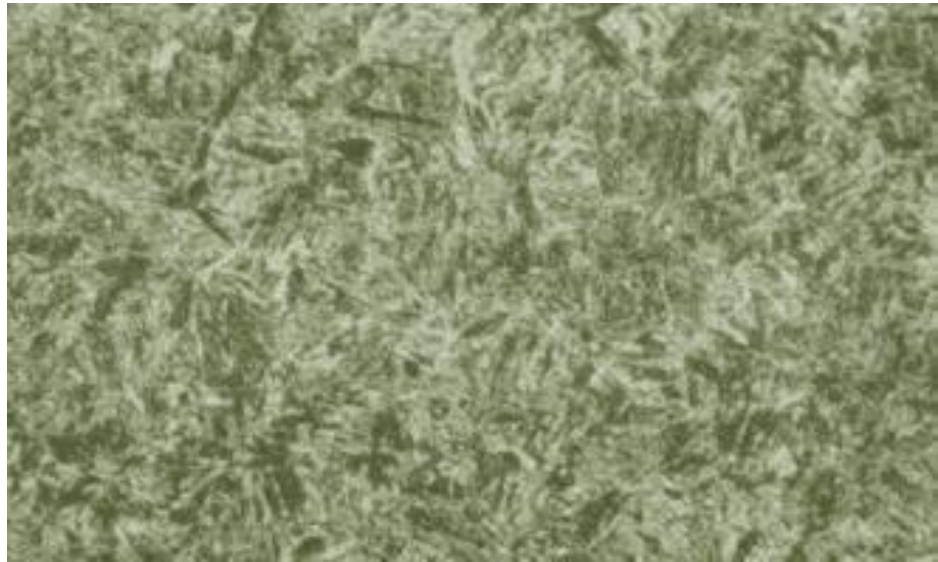
який дещо відрізняється від загартованого зразка, при цьому зі збільшенням температури відпуску відбувається карбідне осадження замість рейкового мартенситу. Коли температура відпуску підвищується до 400 °С (рисунок 3.4, в, мікроструктура відпущеного зразка складається переважно з рейкового мартенситу та фериту. Пояснюється це тим, що, що аустеніт розкладається, і подальше підвищення температурних діапазонів (300...450 °С) призводить до утворення пластинчастої фази цементиту ( $Fe_3C$ ) (рисунок 3.4, в,). Мікроструктура відпущеного зразка відповідає температурі відпуску 600 °С (рисунок 3.4 г), складається з фериту та карбідів.



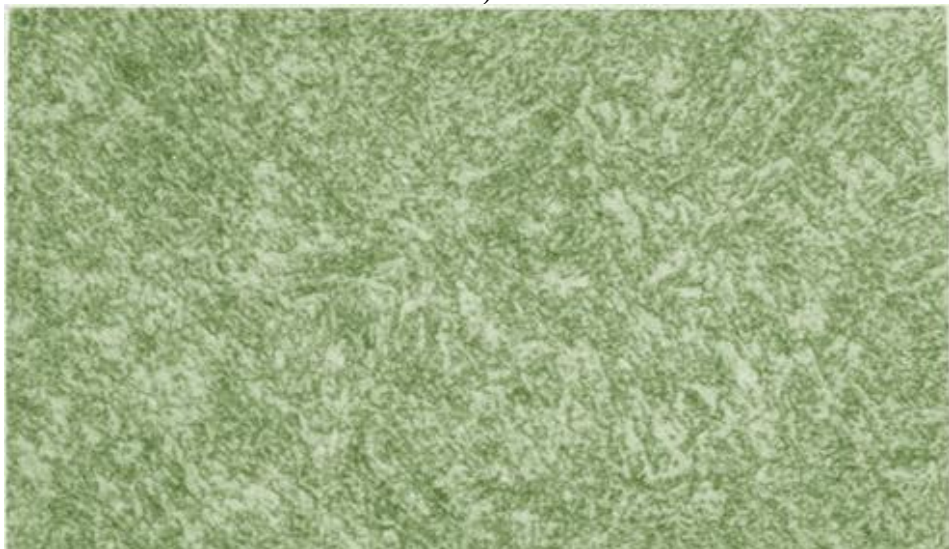
а)

Рисунок 3.4 – Мікроструктура сталі 41Cr4 після гартування в залежності від режиму відпуску,  $\times 100$ : а – без відпуску; б – температура відпуску 200 °С; в – температура відпуску 400 °С; г – температура відпуску 600 °С

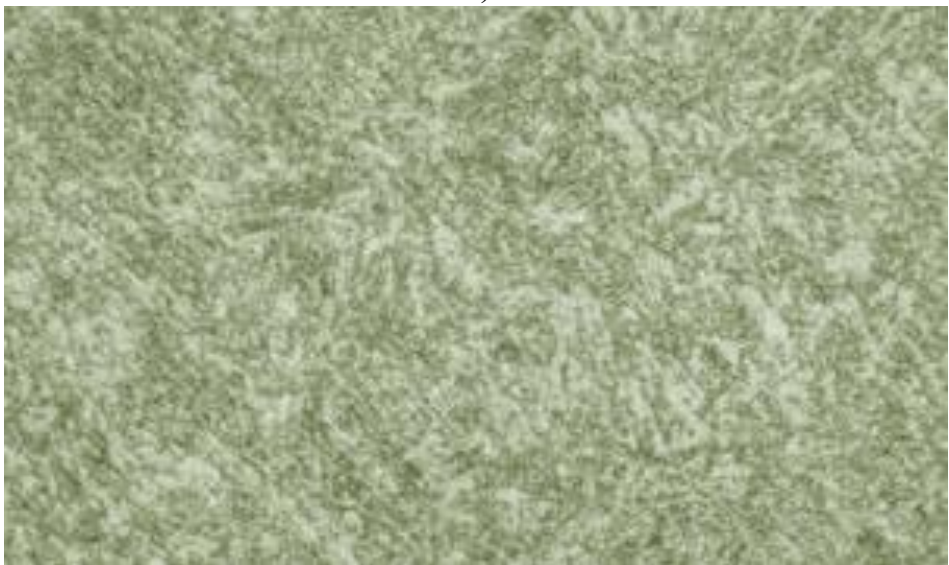
					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30



б)



в)



г)

Рисунок 3.4, продовження

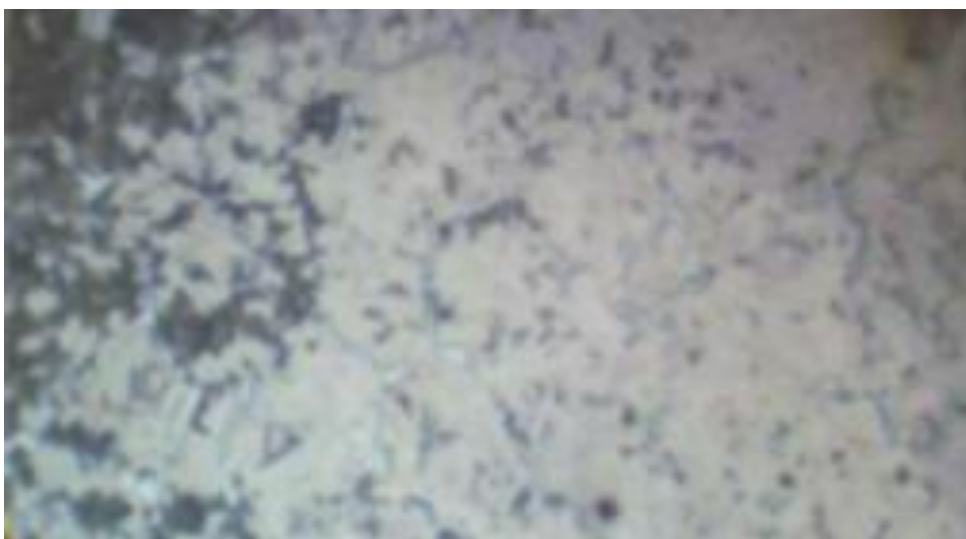
					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31



кількості залишкового аустеніту. На глибині до 1 мм розташована перехідна зона (рисунок 3.6, б). Фазовий склад у цій області – мартенсит, залишковий аустеніт та структурно вільний ферит. Цей структурно вільний ферит залишається нерозчиненим під час процесу нагрівання, оскільки ця частина зразка нагрівається до температур, розташованих між точками  $A_{C1}$  та  $A_{C3}$ .



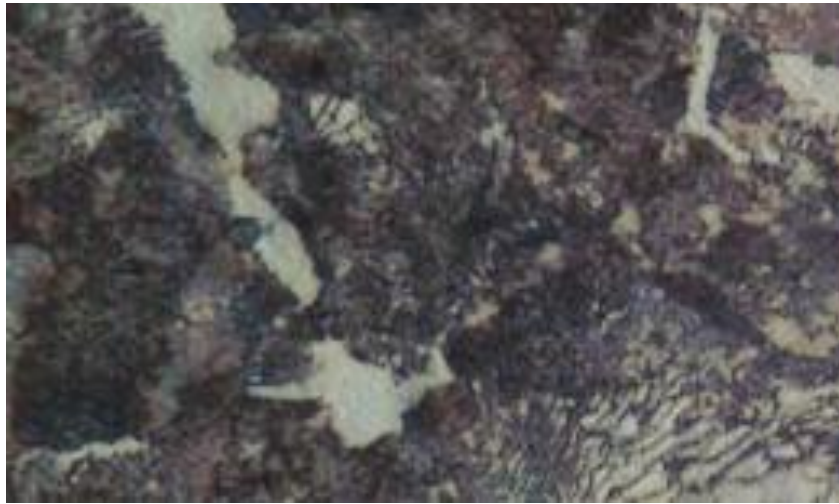
а)



б)

Рисунок 3.6 – Структурний стан індукційно зміцненого зразка з тривалістю нагрівання 10 с,  $\times 400$ : а) – поверхневий шар з мартенситною структурою; б) – перехідна зона; в) – основний матеріал

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33



в)

рисунок 3.6, продовження

Це відображає твердість, яка знижується зі значення 580...620HV0.1 (рисунок 3.5), характерне для мартенситної структури на поверхні зразка, приблизно до 200HV0.1, що відповідає вихідній феритноперлітній структурі (рисунок 3.6, в) сталі марки 41Cr4.

### 3.3. Висновки з проведених досліджень

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що температура високого відпуску після об'ємного гартування сталі 41Cr4 суттєво впливає на формування мікроструктури та комплекс фізико-механічних властивостей матеріалу. Зі зростанням температури відпуску в інтервалі 500...600 °C відбувається перехід від перенасиченого мартенситу до стабільного відпущеного мартенситу з рівномірно розподіленими карбідами, що супроводжується зниженням твердості та зростанням в'язкості й опору втомі.

Встановлено, що вибір температури високого відпуску в діапазоні 560...580 °C є оптимальним для забезпечення в'язкого та стабільного ядра вала, зокрема в зоні шпонкового з'єднання, при збереженні достатнього рівня міцності для роботи в умовах комбінованих згинально-крутних навантажень.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після проведення індукційного гартування сформувався виражений градієнт властивостей по перерізу деталі: поверхневий шар характеризується дрібнодисперсною мартенситною структурою з підвищеною твердістю, тоді як серцевина зберігає структуру відпущеного мартенситу, отриману на стадії поліпшення. Така структурна неоднорідність є технологічно доцільною для валів-шестерень редукторів.

Застосування низького відпуску після індукційного гартування при температурах 160...200 °С дозволило знизити рівень внутрішніх напружень у поверхневому шарі без істотного зменшення твердості, що підтверджується збереженням високих значень поверхневої мікротвердості та відсутністю ознак мікротріщиноутворення.

За результатами мікроструктурних досліджень встановлено, що обрана схема термічної обробки забезпечує оптимальне поєднання властивостей: в'язке ядро – зносостійкий поверхневий шар, що є критично важливим для привідного вала-шестерні кінцевого одноступеневого редуктора.

Таким чином, експериментально підтверджено доцільність застосування гартування з високим відпуском з подальшим індукційним гартуванням і низьким відпуском як ефективного способу керування фізико-механічними властивостями сталі 41Cr4, що дозволяє адаптувати матеріал до реальних умов експлуатації та підвищити надійність і ресурс деталі.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 4.1. Технологічний процес виготовлення вала-шестерні зі сталі 41Cr4

Повний режим термічної обробки вала-шестерні зі сталі 41Cr4 (зуби нарізані до основної термічної обробки)

##### 005 Штампувальна

1 Штампувати заготовки зі сталі 41Cr4.

##### 010 Механічна

1 Обробити зовнішні поверхні з дотриманням припусків

2 Нарізати зуби конічної шестерні ( $m = 4,5$ ,  $z_1 = 20$ ),

Зберігши припуски:

– під шліфування шийок  $\varnothing 35$ : 0,2...0,4 мм/сторону;

– під можливу корекцію зуба (мінімальні).

##### 015 Поліпшення

##### 015.01 Аустенітизація

1 Подати захисну атмосферу

2 Нагріти заготовки до температури 840..860 °С

3 Витримати заготовки для повного прогріву протягом 30...45 хв

##### 015.02 Гартування

1 Охолодити заготовки в 10 % розчині РАG-типу (поліалкіленгліколь) до температури 50...80 °С, далі на повітрі

Контролювати структуру: мартенсит по всьому перерізу

##### 015.03 Високий відпуск

1. Провести високий відпуск при температурі 540–600 °С, протягом 2...2,5 год

2 Охолодити заготовки на повітрі

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Контролювати твердість серцевини (ядра): 30...34 HRC, структура:  
відпущений мартенсит

020. Механічна обробка

1 Провести чистову токарну обробку.

2 Сформувати шпонковий паз.

025. Індукційне гартування

1. Провести індукційне гартування зубчатого вінця вала-шестерні

2. Провести індукційне гартування посадкових місць підшипників

кочення

Зону зі шпонковим з'єднанням гартування СВЧ не піддаємо

Режим індукційного нагріву:

– температура аустенізації: 860...920 °С (короткочасно, 10 секунд)

– частота 66 кГц, потужність 60 кВт:

– забезпечення рівномірного прогріву профілю зуба;

– уникнення перегріву вершин зубів.

3. Гартувальна(охолодження після індукційного нагріву)

– провести спрей-гартування в 12% розчині PAG-типу

(поліалкіленгліколь).

Параметри після індукційного гартування

– зуби ( $m = 4.5$ ,  $z_1 = 20$ ); твердість: 56–58 HRC; ефективна глибина  
загартованого шару: 1,2...1,8 мм;

– структура: дрібнодисперсний мартенсит;

– стискаючі залишкові напруження;

– твердість: 50...56 HRC;

– глибина шару: 1,5...2,5 мм.

4. Відпуск після індукційного гартування

– низький відпуск, температура 160...200 °С, тривалість 2 год,

охолодження на повітрі

Призначення:

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

- зняття внутрішніх напружень;
- запобігання мікротріщинам у зубах;
- стабілізація індукційного шару

### 030 Шліфувальна

Шліфувати відповідальні посадкові місця

### 035 Контрольна

- 1 Контролювати биття зубчатого вінця;
- 2 Контролювати твердості зубів 56...58 HRC;
3. Контролювати плями контакту кінчної пари.

Підсумкові властивості деталі

- основа вала – відпущений мартенсит (30...34 HRC)
- зуби: індукційно загартований мартенсит (56...58 HRC)
- шийки вала: індукційно загартований шар та в'язка серцевина
- зона шпонки: в'язка, без локального перегартування

Нарізання зубів виконувалося до підведення температури термічної обробки, після чого деталь піддавалася поліпшенню з наступним локальним індукційним гартуванням зубчастого вінця та підшипникових шийок, що дозволило сформувати в'язке ядро і зносостійкий поверхневий шар без погіршення міцності зони шпонкового з'єднання.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

## РОЗДІЛ 5

### КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

#### 5.1. Конструювання основних елементів конічного редуктора

Загальний вигляд редуктора наведено на рисунку 2.1. Основною характеристикою даного редуктора є його передаточне відношення  $u=2,5$ .

Модуль даної чонічної прямозубої пари  $m=4,5$  мм.

З умови  $Z_1=18\dots34$  і  $m= Z_2/ Z_1$  призначаємо  $Z_1=20$  зубів.

Тоді

$Z_2= Z_1m=20\cdot 2.5= 50$  зубів.

Редуктор передає крутний момент від дизельного двигуна потужністю 12 к.с. з мінімальною робочою частотою обертання вала 750 об/хв. Відповідно вся енергія йде на редуктор (без урахування ККД двигуна та муфти).

Враховуємо, що відстань між підшипниками становить 110 мм, консольне розташування шестерні з вильотом 38 мм.

##### 5.1.1 Потужність і крутний момент

Беремо метричну систему вимірювань: 1 к.с. $\approx 0.7355$  кВт.

Потужність

$$P=12\cdot P_{к.с.}=12\cdot 0,7355\approx 8,83 \text{ кВт,}$$

Крутний момент

$$T=9550\cdot P_n=9550\cdot 8.83750\approx 112.4 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

2) Сили в зачепленні (для  $d_1=90$  мм $\approx 0.09$  м).

Колова сила:

$$F_t=2Td_1\approx 2\cdot 112.40.09\approx 2497 \text{ 2497 Н.}$$

Оціночно складові:

Радіальна сила

$$F_r \approx 844 \text{ Н,}$$

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$F_a \approx 338 \text{ Н.}$$

Результуюче поперечне (згинаюче) зусилля

$$F = F_{t2} + F_{r2} \approx 2636 \text{ Н.}$$

3) Згинальний момент в “основі” консолі (біля ближньої опори)

$$M_{\max} = F \cdot a \approx 2636 \cdot 0.038 \approx 100.2 \text{ Н.}$$

(Реакції опор:

$$R_2 = F_a / L \approx 911 \text{ Н, } R_1 \approx 1726 \text{ Н.}$$

4) Напруження в небезпечному перерізі  $\varnothing 25$  мм

Для суцільного

$$d = 0,025 \text{ м}$$

Кручення:

$$\tau_{\max} = 16T / (\pi d^3) \approx 36.6 \text{ МПа.}$$

Згин:

$$\sigma_{\max} = 32M / (\pi d^3) \approx 65.3 \text{ МПа.}$$

Еквівалентне напруження (за Мізесом):

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{65,3^2 + 3 \cdot 36,6^2} = \sqrt{4264 + 4019} = 91 \text{ МПа.}$$

5) З урахуванням шпонкового паза і запасу 2.5

Якщо прийняти консервативно концентрацію напружень  $K_t \approx 2$ :

$$\sigma_{\text{дон}} = K_t \cdot \sigma_{\text{екв}} = 2 \cdot 91 = 182 \text{ МПа.}$$

Вимога запасу  $n = 2.5$  дає “потрібну” межу текучості:

$$\sigma_{y, \text{req}} \approx \sigma_{\text{дон}} \cdot n = 182 \cdot 2.5 \approx 455 \text{ МПа.}$$

Це добре вкладається в реальні можливості 41Cr4 на ділянках після поліпшення до 30...34 HRC, де межа текучості зазвичай вища за цей рівень (особливо для валових деталей). Тобто по міцності з запасом 2,5 вал-шестерня проходить.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

## 5.2. Розробкою автоматизованого конвеєра

### 5.2.1. Загальна компоновка (логіка руху)

Конвеєр має вхідну зона, далі йде зона дозування та орієнтування, далі знаходиться зона нагріву печі, потім вихідна зона та зона передачі на гартування (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд конвеєра

### 5.2.2. Вибір типу конвеєра.

Для валів  $\text{Ø}25\dots92$  мм приймаємо роликівий конвеєр з жаростійкими роликами на вході до печі та ланцюговий крокуючий пічний конвеєр для високої точності.

### 5.2.3. Опис основних вузлів

Основними вузлами конвеєра є: вхідний накопичувач і пристрій подачі; роликівий накопичувач на 20 заготовок; пневмоштовхач для поштучної подачі.

Контур для орієнтації заготовки (позиціонує упори) – вал подається з фіксованою віссю.

На транспортері встановлені давачі: фотоелектричні (наявність заготовки), індуктивні (положення упорів), енкодер подачі (крок/швидкість).

									Арк.
									41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Дозуючий конвеєр (передпіч) синхронізує інтервал між заготовками з тепловим режимом печі. Він дає змогу реалізувати SMED/переналагодження під іншу довжину вала. Привід: асинхронний двигун та частотний перетворювач (VFD).

Прохідна піч розбита на зони: попередній нагрів → аустенітизація → вирівнювання температури.

Контролюється захисна атмосфера (ендогаз) для запобігання декарбурації (зневуглицювання) зубів.

Забезпечується переміщення ланцюгів конвеєра

Вимірювання температури проводимо з використанням термопар типу К у кожній зоні.

Термопара типу К є найбільш поширеною та універсальною з термопар з неблагородних металів.

Матеріал: Позитивний електрод складається зі сплаву хромель (нікель з 9...10% хрому), негативний – зі сплаву алюмель (нікель з добавками алюмінію, марганцю та кремнію).

Температурний діапазон: від мінус 200 °С до плюс 1260 °С (рекомендована тривала межа зазвичай до плюс 1100 °С).

Такі термопари широко використовується у промислових печах, котлах, системах опалення, нафтопереробці, наукових дослідженнях та інших галузях, де не потрібна екстремальна точність.

Переваги – відносно невисока вартість, широкий діапазон вимірювань, хороша стійкість до окислення в окислювальних середовищах, висока чутливість (близько 41 мкВ/°С).

Використано давачі для контролю витрати атмосфери.

Вихідна зона і передача на гартування. Вихідний роликотий конвеєр з тепловим екрануванням. Автоматичний передавач (маніпулятор) у гартівну ванну (PAG).

Таймінг мінімізує затримку між піччю і гартуванням.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

### 5.3. Засоби автоматизації (структура керування)

#### 5.3.1. Рівень керування (PLC)

PLC керує: швидкістю конвеєрів, кроком walking beam, режимами печі (зони, атмосфера), блокуваннями безпеки.

Алгоритми: підтримка часу перебування (residence time), компенсація температурних коливань, аварійні сценарії (зупинка/вивід заготовок).

#### 5.3.2. Людино-машинний інтерфейс (HMI)

Введення рецептів (програм) (41Cr4, розмір, час, температура).

Візуалізація: температур по зонах, швидкості конвеєра, стану датчиків.

Журнали подій/аварій.

#### 5.3.3. Приводи і силова частина.

VFD для ланцюгових конвеєрів (плавний пуск, точний час).

Серводвигуни для дозуючих вузлів. Пневматика (FRL) для штовхачів та упорів.

#### 5.3.4. Контроль якості в потоці.

Вбудований контроль часу/температури для кожної заготовки (трасування партії). Інтерфейс з постом контролю твердості/мікротвердості (поза лінією).

#### 5.3.5. Безпека.

Світлові завіси, кінцеві вимикачі. Контроль температури ланцюга. Аварійний байпас і безпечна зупинка печі. Переваги автоматизованого конвеєра для твого процесу. Стабільність ТМО (однаковий тепловклад для кожної заготовки). Зменшення деформацій (рівномірний прогрів, контроль часу). Зростання ОЕЕ та зниження людського фактора.

Готовність до інтеграції з гартівною ванною та індукційною установкою.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

#### 5.4. Послідовність роботи завантажувального конвеєра

На першому етапі на конвеєрі укладки заготовок в підвіс для вертикального утримання заготовок встановлюємо спеціалізовану тару (підвіс) і навантажуємо 20 заготовок і переміщаємо рухомий завантажувальний конвеєр до завантажувального стола печі (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2 – Завантажувальний конвеєр в процесі переміщення від дільниці укладання до завантажувального стола печі

Далі датчики перевіряють точність переміщення і наявність заготовок в підвісі. Після появи в печі місця для наступної садки за наявності на позиції завантаження укладеного підвісу відкриваються двері прохідної печі, штовхач подає підвіс з заготовками на завантажувальний стіл печі (рисунок 5.3), звідки конвеєр печі захоплює тару із заготовками і переміщає в зону підігріву. Дверцята зачиняються. Після цього завантажувальний конвеєр повертається до конвеєра укладки заготовок.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



“кроках” S0...S6, із міжблокуваннями (interlocks), таймерами та підтвердженнями датчиків.

1) Умовні входи/виходи: I/O

Входи (I)

I0.0 START (Пуск)

I0.1 STOP (Стоп)

I0.2 E\_STOP\_OK (Аварійний ланцюг справний / Safety OK)

I0.3 AUTO (1=Авто)

I0.4 RESET (Скидання аварій/кроків)

I1.0 LS\_TR\_HOME (завантажувальний конвеєр у “домі” біля транспортера укладки)

I1.1 LS\_TR\_FURN (завантажувальний конвеєр біля печі)

I1.2 BIN\_PRESENT (тара на завантажувальному транспортері / захоплена)

I1.3 TABLE\_READY (приймальний/завантажувальний стіл печі готовий, можна подавати)

I1.4 DOOR\_OPEN\_FB (дверцята відкриті – підтвердження)

I1.5 DOOR\_CLOSED\_FB (дверцята закриті – підтвердження)

I1.6 PUSHER\_RETR\_FB (штовхач втягнутий – підтвердження)

I1.7 PUSHER\_EXT\_FB (штовхач висунутий – підтвердження)

(Опційно)

I2.0 TR\_FAULT (аварія приводу транспортера)

I2.1 DOOR\_FAULT

I2.2 PUSHER\_FAULT

Виходи (Q)

Q0.0 TR\_MOVE\_HOME (рух транспортера до “дому”)

Q0.1 TR\_MOVE\_FURNACE (рух транспортера до печі)

Q0.2 DOOR\_OPEN\_CMD

Q0.3 DOOR\_CLOSE\_CMD

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Q0.4 PUSHER\_EXT\_CMD

Q0.5 PUSHER\_RETR\_CMD

(Опційно)

Q0.6 BIN\_CLAMP (затискач/фіксатор тари на транспортері)

Q0.7 ALARM\_LAMP

2) Кроки циклу (бітова логіка)

Позначимо кроки як M10.0...M10.6:

M10.0 S0\_IDLE – очікування/готовність (у домі, штовхач втягнутий, двері закриті)

M10.1 S1\_PICK\_BIN – “взяти/зафіксувати тару” (якщо є затискач)

M10.2 S2\_GO\_FURN – їхати до печі

M10.3 S3\_OPEN\_DOOR – відкрити двері

M10.4 S4\_PUSH\_IN – подати тару штовхачем на завантажувальний стіл

M10.5 S5\_CLOSE\_DOOR – закрити двері

M10.6 S6\_GO\_HOME – повернутися до транспортера укладки

Після S6 → знов S0.

3) Загальні умови роботи (RUN), аварії, стоп

Network 1 – Дозвіл RUN (самопідхват)

RUN = M0.0

RUN встановлюється, якщо:

AUTO=1, E\_STOP\_OK=1, START натиснуто, STOP не активний

RUN скидається, якщо:

STOP або E\_STOP\_OK=0 або RESET

У LAD це робиться класичним SR-тригером:

S: AUTO & E\_STOP\_OK & START & ¬STOP

R: STOP OR ¬E\_STOP\_OK OR RESET

4) Ініціалізація кроків

Network 2 – Початковий крок S0

На RESET або при першому запуску:

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

встановити S0\_IDLE

скинути S1...S6

У LAD:

Якщо RESET → (R) S1..S6, (S) S0

Якщо RUN=1 і жоден крок не активний → (S) S0

5) Логіка переходів між кроками (основний автомат)

Network 3 – S0\_IDLE: умови готовності і перехід у S1

S0\_IDLE активний, коли система у вихідному стані:

TR\_HOME=1

DOOR\_CLOSED\_FB=1

PUSHER\_RETR\_FB=1

Перехід S0 → S1, якщо:

RUN=1

BIN\_PRESENT=1 (тара є/захоплена) (або “тара готова до захоплення” – як у тебе реалізовано датчиком)

LAD (умовно):

Якщо S0 & RUN & BIN\_PRESENT & LS\_TR\_HOME & DOOR\_CLOSED\_FB & PUSHER\_RETR\_FB (R) S0, (S) S1

Network 4 – S1\_PICK\_BIN: фіксація тари (опційно) і перехід у S2

Якщо є затискач:

У S1 включити Q0.6 BIN\_CLAMP

Дочекатися BIN\_PRESENT=1 (або “CLAMP\_OK” якщо окремий датчик)

Перехід S1 → S2:

RUN=1

BIN\_PRESENT=1 (або CLAMP\_OK)

У LAD:

S1 активує Q0.6

Якщо S1 & RUN & BIN\_PRESENT → (R)S1 (S)S2

Якщо затискача нема, S1 можна прибрати (S0 → S2).

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Network 5 – S2\_GO\_FURN: рух до печі

У S2:

Q0.1 TR\_MOVE\_FURN = 1

Заборонити рух HOME

Перехід S2 → S3, якщо:

LS\_TR\_FURN=1 (приїхали до печі)

і (бажано) TABLE\_READY=1

У LAD:

Якщо S2 & LS\_TR\_FURN & TABLE\_READY → (R)S2 (S)S3

Тайм-аут (рекомендовано):

TON T1\_MoveToFurn (10 с).

Якщо T1.Q=1 і LS\_TR\_FURN=0 → ALARM і зупинка RUN.

Network 6 – S3\_OPEN\_DOOR: відкриття дверей

У S3:

Q0.2 DOOR\_OPEN\_CMD = 1

Не дозволяти штовхач

Перехід S3 → S4, якщо:

DOOR\_OPEN\_FB=1

Тайм-аут TON T2\_DoorOpen (наприклад 5–10 с). Якщо не відкрились → аварія.

Network 7 – S4\_PUSH\_IN: подача тари штовхачем на стіл

Умови безпеки входу в S4 (і виконання):

DOOR\_OPEN\_FB=1

TABLE\_READY=1

PUSHER\_RETR\_FB=1 (старт з втягнутого)

У S4:

Q0.4 PUSHER\_EXT\_CMD = 1 до підтвердження PUSHER\_EXT\_FB

Після досягнення кінця:

витримка 0.5–1.0 с (TON T3\_Dwell),

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

потім команда втягнути:

Q0.5 PUSHER\_RETR\_CMD = 1 TO PUSHER\_RETR\_FB

Перехід S4 → S5, коли:

PUSHER\_RETR\_FB=1 (повернувся)

“BIN\_TRANSFER\_OK” якщо є датчик, що тара на столі печі

Тайм-аути:

T4\_PusherExtend (2...5 с)

T5\_PusherRetract (2...5 с)

Network 8 – S5\_CLOSE\_DOOR: закриття дверей

У S5:

Q0.3 DOOR\_CLOSE\_CMD = 1

Перехід S5 → S6, якщо:

DOOR\_CLOSED\_FB=1

Тайм-аут T6\_DoorClose.

Network 9 – S6\_GO\_HOME: повернення до транспортера укладки

У S6:

Q0.0 TR\_MOVE\_HOME = 1

Перехід S6 → S0, якщо:

LS\_TR\_HOME=1

Далі цикл повторюється.

б) Формування виходів (щоб не було конфліктів)

Робимо окремими мережами:

TR\_MOVE\_FURN = S2

TR\_MOVE\_HOME = S6

DOOR\_OPEN\_CMD = S3

DOOR\_CLOSE\_CMD = S5

PUSHER\_EXT\_CMD = S4 & DOOR\_OPEN\_FB & TABLE\_READY

PUSHER\_RETR\_CMD = S4 & (PUSHER\_EXT\_FB OR T3\_Dwell.Q)

Важливо:

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Ніколи не вмикайте одночасно EXT і RETR.

Ніколи не вмикай OPEN і CLOSE разом.

Рух конвеєра заборонити, якщо штовхач не втягнутий (міжблокування).

7) Аварійні блокування (мінімальний набір)

Вводиш FAULT = M0.1:

FAULT встановлюється при:

TR\_FAULT або DOOR\_FAULT або PUSHER\_FAULT

або будь-який тайм-аут (T1..T6)

При FAULT:

RUN скинути

всі виходи скинути

Q0.7 ALARM\_LAMP = 1

дозволити RESET для скидання FAULT

Це критично, щоб програма була “виробничою”, а не навчальною.

## 5.6. Охорона праці та навколишнього середовища

### 5.6.1. Охорона праці на термічній дільниці

Термічна дільниця виготовлення привідного вала-шестерні зі сталі 41Cr4 належить до виробництв з підвищеною небезпекою, оскільки пов'язана з впливом високих температур, відкритих нагрівальних елементів, гарячих поверхонь, гартівних середовищ, електромагнітних полів та рухомих механізмів. Організація охорони праці на дільниці повинна забезпечувати безпечні умови роботи персоналу, запобігання травматизму та професійним захворюванням.

До роботи на термічній дільниці допускаються лише працівники, які пройшли вступний, первинний та повторний інструктаж з охорони праці; пройшли навчання та перевірку знань з безпечної експлуатації термічного та

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

електротехнічного обладнання; мають відповідну групу з електробезпеки (не нижче II для термічної дільниці та III — для індукційних установок).

#### 5.6.2. Охорона праці на дільниці гартування та високого відпуску

##### 5.6.2.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

На дільниці гартування і високого відпуску на працівників можуть впливати:

- висока температура поверхонь печей і нагрітих заготовок;
- інфрачервоне теплове випромінювання;
- розбризкування гартівного середовища (масло або полімерний розчин);
- пари та аерозолі гартівних середовищ;
- підвищений рівень шуму;
- можливість опіків і займання.

##### 5.6.2.2. Вимоги безпеки до обладнання

Печі гартування та відпуску повинні бути обладнані теплоізоляцією, захисними кожухами та блокуванням дверцят.

Гартівні ванни мають оснащуватися:

- кришками або екранами від розбризкування;
- системою витяжної вентиляції;
- автоматичним контролем температури середовища.

Забороняється експлуатація ванн з витоком гартівного середовища або пошкодженими електронагрівачами.

##### 5.6.2.3. Організаційні та індивідуальні заходи захисту

Переміщення нагрітих деталей здійснюється лише механізованими засобами (кліщі, захвати, маніпулятори).

Працівники повинні використовувати:

- термостійкий спецодяг;
- захисні рукавиці;
- захисні окуляри або щитки;
- взуття з термостійкою підошвою.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Забороняється перебування персоналу безпосередньо над гартівною ванною під час занурення заготовки.

### 5.6.3. Охорона праці на дільниці індукційного гартування

#### 5.6.3.1. Основні небезпечні фактори

Індукційне гартування характеризується додатковими ризиками:

- вплив електромагнітного поля високої частоти;
- висока напруга та струми в індукторах;
- локальні зони надвисокої температури;
- водяне або полімерне охолодження під тиском;
- можливість ураження електричним струмом.

#### 5.6.3.2. Вимоги безпеки до індукційної установки

Індукційна установка повинна мати:

- заземлення всіх металевих частин;
- електричні блокування, що унеможливають роботу при відкритих кожухах;
- аварійну кнопку зупинки.

Охолоджувальні системи (вода/полімер) повинні мати контроль тиску і потоку.

Індуктори та кабелі не допускається експлуатувати з пошкодженою ізоляцією.

#### 5.6.3.3. Захист персоналу

Робочі місця повинні бути винесені за межі зони максимального електромагнітного поля.

Оператор керує процесом дистанційно з пульта керування.

Забороняється проведення ремонтних робіт без повного знеструмлення установки та встановлення попереджувальних знаків.

### 5.6.4. Охорона праці при роботі автоматизованого завантажувального конвеєра

#### 5.6.4.1. Небезпечні фактори

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

При роботі автоматизованого завантажувального конвеєра можливі:

- зтягування або защемлення частин тіла рухомими елементами;
- зіткнення з рухомою тарою;
- небезпека при відкриванні дверцят печі;
- ризик травмування при відмові датчиків або приводів.

#### 5.6.4.2. Технічні засоби безпеки

Усі рухомі частини конвеєра повинні бути огорожені.

Передбачаються:

- кінцеві вимикачі положення;
- фотоелектричні датчики присутності;
- світлові завіси у зоні доступу оператора.

Дверцята печі обладнуються блокуванням, що унеможливорює рух конвеєра при відкритому стані.

#### 5.6.4.3. Організація безпечної експлуатації

Робота конвеєра здійснюється в автоматичному режимі під керуванням PLC.

Перехід у ручний режим дозволяється лише для налагодження при зниженій швидкості.

Перед пуском лінії перевіряється справність аварійних кнопок та блокувань.

#### 5.6.5. Висновок з охорони праці

Запропоновані заходи з охорони праці забезпечують зниження рівня виробничих ризиків на термічній ділянці та при роботі автоматизованого завантажувального конвеєра. Комплексне застосування технічних, організаційних та індивідуальних засобів захисту дозволяє створити безпечні умови праці, підвищити надійність обладнання та зменшити вплив шкідливих факторів на персонал.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

## ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. В атестаційній роботі виконано аналіз конструкції привідного вала кінцевого одноступеневого редуктора, умов його експлуатації та характеру навантажень. Встановлено, що вал працює в умовах комбінованого згинально-крутильного навантаження, підвищених контактних напружень у зоні зубчастого вінця та наявності концентраторів напружень у зоні шпонкового з'єднання, що зумовлює підвищені вимоги до в'язкості ядра та зносостійкості робочих поверхонь.

2. Проаналізовано вимоги до точності та твердості поверхонь функціональних ділянок вала. Встановлено доцільність формування диференційованого комплексу властивостей: в'язкого та міцного ядра вала (серцевини) при підвищеній твердості зубчастого вінця та підшипникових шийок, що забезпечує надійну роботу редуктора в умовах циклічного навантаження.

3. Обґрунтовано вибір сталі 41Cr4 як матеріалу привідного вала, яка за хімічним складом та комплексом механічних властивостей є повноцінним аналогом сталі 40X і відповідає вимогам сучасного машинобудування. Встановлено, що дана сталь характеризується доброю прогартованістю, технологічністю та придатністю до локального індукційного гартування.

4. Визначено оптимальні режими термічної обробки вала, які включають гартування з високим відпуском (поліпшення) з метою формування в'язкого ядра, а також локальне індукційне гартування зубчастого вінця та підшипникових шийок з наступним низьким відпуском. Показано, що така схема забезпечує раціональний розподіл твердості та напружень по перерізу деталі.

5. Розроблено базовий технологічний маршрут виготовлення привідного вала, який охоплює операції заготівельного виробництва, механічної обробки, термічної та індукційної обробки, а також фінішного контролю.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Запропонований маршрут забезпечує стабільність геометричних параметрів і відтворюваність фізико-механічних властивостей деталі.

6. Розроблено технічну концепцію автоматизованого конвеєра транспортування валів між технологічними позиціями, що забезпечує синхронізовану подачу заготовок у прохідну піч та їх передачу на наступні операції. Визначено склад основних виконавчих механізмів, датчиків положення та наявності, а також систему керування на базі програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7.

7. Запропоновано алгоритм автоматизованого керування завантажувальним конвеєром, реалізований мовою LAD, який забезпечує циклічність процесу, міжблокування виконавчих механізмів та безпечну взаємодію з обладнанням прохідної камерної печі.

8. Розроблено заходи з охорони праці, пожежної та екологічної безпеки для термічної дільниці, дільниці індукційного гартування та автоматизованої лінії транспортування. Встановлено, що впровадження запропонованих заходів дозволяє знизити рівень виробничих ризиків та забезпечити безпечні умови праці персоналу.

#### Практичні рекомендації

1. Рекомендується впроваджувати виготовлення привідних валів редукторів зі сталі 41Cr4 із застосуванням схеми поліпшення з наступним індукційним гартуванням, що дозволяє підвищити ресурс роботи зубчастої пари та підшипникових вузлів без зростання крихкості деталі.

2. Доцільно застосовувати керовані гартівні середовища (10...15 % полімерні розчини типу PAG) при об'ємному гартуванні для зменшення деформацій та забезпечення стабільності геометричних параметрів вала.

3. Для підвищення відтворюваності результатів термічної обробки рекомендується використовувати прохідні печі з автоматизованою подачею заготовок та контролем часу перебування в зонах нагріву.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

4. У серійному та масовому виробництві доцільно впроваджувати автоматизовані завантажувальні конвеєри, керовані PLC Siemens SIMATIC S7, з реалізацією міжблокувань, датчиків положення та аварійних зупинок.

5. Рекомендується обов'язкове виконання низького відпуску після індукційного гартування з метою зниження внутрішніх напружень і підвищення надійності поверхневого шару.

Запропоновані заходи з охорони праці та екологічної безпеки доцільно використовувати як типові для проєктування автоматизованих термічних дільниць машинобудівних підприємств.

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shigley, J. E., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design (10th ed.). New York: McGraw-Hill, 2015. (design criteria for shafts, tolerances, surface finish)
2. ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) – ISO system of limits and fits – Part 1: Bases of tolerances, deviations and fits. Geneva: International Organization for Standardization.
3. ISO 1302:2002. Geometrical product specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. Geneva: International Organization for Standardization.
4. Harris, T. A., & Kotzalas, M. N. Rolling Bearing Analysis (5th ed., 2-Volume Set). Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. (fits, bearing life, load/speed effects)
5. Malkin, S., & Guo, C. Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives (2nd ed.). New York: Industrial Press, 2008. (finish grinding, burn prevention, residual stresses)
6. EN 10083-3:2006/2007. Steels for quenching and tempering – Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels. Brussels: CEN. (grade 41Cr4, properties, delivery conditions)
7. ASM International. ASM Handbook, Vol. 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. Materials Park, OH: ASM International, 2013. (heat treatment of Cr steels, quench/temper ranges) ASM International
8. Totten, G. E. (ed.). Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. (chromium effects, hardenability, carbides)
9. DIN 6885. Parallel keys and keyways – Dimensions and tolerances. Berlin: DIN. (standardized key sizes/series)
10. DIN 5480. Involute splines based on reference profile – General data, dimensions and tolerances. Berlin: DIN. (module range, 30° pressure angle, geometry)

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

11. Shingo, S. A Revolution in Manufacturing: The SMED System. Portland, OR: Productivity Press, 1985 (reprints via CRC/Routledge). (setup reduction methodology)

12. Ohno, T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Portland, OR: Productivity Press, 1988. (lean flow, JIT, jidoka)

13. Nakajima, S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Portland, OR: Productivity Press, 1988. (OEE within TPM context).

14. ISO 21940 (various parts, incl. -11, -21). Mechanical vibration – Rotor balancing and assessment. Geneva: ISO. (balance quality grades, machine performance tests).

15. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 System Manual; HMI Basic/Unified Panels – Operating Instructions; TIA Portal Online Help (PROFINET configuration). Nuremberg: Siemens, 2019–2023. (PLC/HMI architecture, PROFINET, diagnostics).

					MP 1725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59