

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи


магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс
автомобілів»

на тему: «Розробка режиму поверхневого гартування для
підвищення твердості відновленого коромисла»

Шифр ***МРТАМ 2318103.ПЗ***

Виконала: студента 2-го курсу, група МТВАм 22-1  С.О. Яременко
Підпис виконав. програми

Керівник *к.т.н., доц. каф. ТАМ.*

 О.С. Дробот
Виконав. програми

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*

 О.В. Диха
Виконав. програми

18 12 2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри TAM

проф., д.т.н. Діхв О.В.

21 жовтня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Яременку Сергію Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема проекту (роботи) «Розробка режиму поверхневого гартування для підвищення твердості відновленого коромисла»

керівник проекту (роботи) Дробот О.С., к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце роботи

Затверджено наказом університету від 15 серпня 2023 р. № 28 (Д30)

2. Строк подання студентом проекту на кафедру 10 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

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

Розділ 1. Аналіз стану проблеми; Розділ 2. Огляд літературних джерел;

Розділ 3. Експериментальна частина; Розділ 4. Практична частина

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

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Проміжок
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2023</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10.2023</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11.2023</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11.2023</i>	
5	<i>Оформлення презентації магістерської роботи</i>	<i>1.12.2023</i>	
6	<i>Нормоконтроль магістерської роботи</i>	<i>5.12.2023</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>10.12.2023</i>	

Студент


Підпис

Керівник проекту (роботи)


Підпис

Яременко С.О.
Ініціали, прізвище

Дробот О.С.
Ініціали, прізвище

Реферат

Тема роботи : «Розробка режиму поверхневого гартування для підвищення твердості відновленого коромисла».

пояснювальної записки – 73 сторінки, кількість рисунків - 43, таблиць - 10, додатків - 2, кількість джерел згідно із переліком посилань - 31.

Газорозподільний механізм призначений для своєчасного впуску в циліндри свіжого повітря (дизелі) або пальної суміші (карбюраторні двигуни), впуску підпрацьованих газів, а також для надійної ізоляції внутрішньої порожнини циліндрів від зовнішнього середовища під час тактів стиску й робочого ходу.

Коромисло має вигляд двоплечового важеля і здійснює коливаючі рухи. В двигунах внутрішнього згоряння коромисло клапана використовують для перетворення руху розподільного вала у відкриття і закриття клапанів. Під час роботи коромисло зазнає деформацій, зношування, піддається впливу значних навантажень. Тому коромисла виготовляють з середньо вуглецевих сталей і піддають термічній обробці: нормалізації або гартуванню і високому відпуску, а боків додатково зміцнюють одним із способів поверхневого зміцнення: цементація, лазерне гартування, індукційне гартування.

Коромисла працює у важких умовах, знаходиться під дією знакозмінних напружень, зазнає деформацій, зносу від циклічних та динамічних навантажень. Для надійної роботи за таких умов матеріал коромисла повинен мати високі показники міцності ($\sigma_{0.2}$, $\sigma_{0.4}$), утомної міцності (σ_{-1}) та ударної в'язкості, тобто високу конструкційну міцність та твердість.

Ціль і завдання: Вибрати марку сталі для виготовлення коромисла. Вибрати спосіб зміцнення деталі. Зробити аналіз доцільності проведення гартування струмом високої частоти. Вивчити та зробити аналіз структурних перетворень, які відбуваються в сталі при нагріванні струмом високої частоти. Виявити особливості структурних змін в сталі при виконанні гартування СВЧ.

запропонувати ефективні технологічні процеси для збільшення ресурсу роботи газорозподільного механізму, підвищення міцності та зносостійкості відповідальної деталі «коромисла».

Актуальність теми. Коромисло відповідає за роботу газорозподільного механізму, належить до деталей, які виконують передавальну функцію. Під час роботи зазнає тертя, що спричиняє його знос та працює у напруженому стані під дією циклічних, динамічних навантажень тому його робота має бути надійною та довготривалою. Відновлення та зміцнення коромисла та підвищення його механічних характеристик є актуальним, своєчасним і перспективним завданням.

Ціль випускної роботи. Однією з основних цілей випускної роботи є аналіз причин виходу з ладу коромисла, підвищення його міцності, зносостійкості, твердості проведенням гартування з нагріванням струмом високої частоти

Вибір об'єкта досліджень.

Коромисло є відповідальною деталлю газорозподільного механізму. Коромисло виготовлено як сталевий нерівноплічний важіль: довге плече розташоване над клапаном, а коротке - над штангою. У короткому плечі є отвір, в який вкручують регульовальний гвинт з контргайкою.

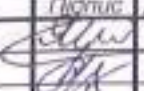



Під час експлуатації двигуна на коромисло постійно діють високі навантаження. Коромисло працює переважно на знос. Коромисло повинне мати високу утомну міцність, міцність, твердість

Основними видами пошкоджень коромисла є деформація, знос бойка, руйнування. Відновлення зношених коромисел здійснюють механічною обробкою з наступною термічною чи хіміко-термічною обробкою. Пропонується підвищити характеристики міцності і зносостійкості відновлених коромисел проведенням термічної обробки за оптимальними режимами.

Перелік ключових слів: КОРОМИСЛО, В'ЯЗКІСТЬ, ДЕФОРМАЦІЯ, ГАРТУВАННЯ, МАРТЕНСИТ, КРИТИЧНИЙ ДІАМЕТР, СТРУМ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ, ІНДУКТОР, ЦЕМЕНТАЦІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
Актуальність роботи.....	8
Мета і задачі досліджень.....	8
Об'єкт і предмет досліджень.....	8
Наукова новизна отриманих результатів.....	8
Практична значущість отриманих результатів.....	8
Апробація результатів роботи.....	8
Публікації.....	8
Структура і об'єм роботи.....	9
 РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ...	
1.1. Призначення, будова та схема роботи газорозподільного механізму ГРМ.	10
1.2. Будова клапанного механізму газорозподілу.....	13
1.3. Будова, функції і умови роботи коромисла	14
1.3.1. Конструктивні особливості коромисла.....	15
1.4. Аналіз умов експлуатації коромисла.....	17
1.5. Матеріали для виготовлення коромисла.....	17
1.6. Методи зміцнення коромисла.....	18

MP TAM 23.18103. 000 ПЗ				
Змі	Арк.	№ докум	Підпис	Дат
Розроб.		Яременко		
Перевір.		Дробот		
Реценз.				
Н. Контр.		Бабак		
Затверд.		Диха		
Розробка режиму поверхневого гартування для підвищення твердості відновленого коромисла				
		Літ	Арк.	Аркушів
			4	72
ХНУ група МТВАм 22-1				

РОЗДІЛ 2. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	19
2.1. Методи зміцнення деталей ГРМ.....	19
2.1.1. Гартування лазерним випромінюванням.....	21
2.1.2. Зміцнення поверхні виробів цементацією.....	22
2.1.3. Зміцнення індукційним нагріванням струмом високої частоти.....	23
2.2. Основи індукційного нагрівання.....	23
2.2.1. Вплив високочастотного гартування на механічні властивості сталі.....	27
2.2.2. Особливості фазових перетворень в сталі при нагріванні струмом високої частоти.....	28
2.2.3. Вплив умов охолодження на структуру і властивості загартованої сталі.....	31
2.2.4. Розподіл температури під час нагрівання при поверхневому гартуванні.....	34
2.2.5. Розподіл швидкостей охолодження по перерізу виробу при поверхневому гартуванні.....	36
2.2.6. Розподіл структури і твердості по перерізу поверхнево загартованого виробу.....	38
2.3. Відпуск поверхнево загартованих деталей.....	39
2.4. Способи поверхневого високочастотного гартування.....	40
2.5. Залишкові напруження в поверхнево загартованих виробках.....	45
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	50
3.1. Методика проведення експериментальних досліджень.....	50
3.1.1. Методика проведення мікроструктурних досліджень.....	50
3.2. Розробка режиму та інструменту для індукційного гартування.....	52
3.2.1 Характеристика сталі 45.....	53
3.2.2. Вплив хімічного складу сталі на її властивості.....	54
3.2.3. Характеристика структурних складових сталі.....	56
3.2.5. Режими термічної обробки виробів із сталі 45.....	58
3.2.6. Попередня термічна обробка.....	59

					MPTAM 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змі.	Арк.	№ докум.	Гідрос.	Дата		5

ВСТУП

Надійність та довговічність автомобіля залежать від надійної роботи кожного вузла та окремих деталей. Так як деталі мають різну довговічність, то вихід з ладу окремих деталей потребує ремонту автомобіля та заміни чи відновлення зношених вузлів. Підвищити строк експлуатації автомобіля можна створенням безпечних умов експлуатації авто, своєчасним та якісним обслуговуванням та ремонтом, що не викликає передчасного зношування деталей та вузлів. Погані дорожні умови, некваліфіковане керування а також неякісне та несвоєчасне обслуговування є додатковими факторами, які скорочують строки експлуатації автомобіля.

Передчасний вихід з ладу окремої деталі чи вузла може бути результатом порушення конструкторських чи технологічних параметрів: невірно вибраного матеріалу, незадовільних режимів термічної та механічної обробки. Однак практика показує, що знос деталей прискорюється низькоякісним технічним обслуговуванням, іноді не своєчасним його проведенням. Несправності в автомобілі виникають внаслідок зносу деталей під дією сил тертя, втоми поверхневих шарів, чи навантажень, що перевищують розрахункові. Внаслідок зносу змінюються початкові розміри спряжених поверхонь деталей, їх геометрична форма спотворюється, якщо знос нерівномірний. На спряжених поверхнях деталей з'являються ризики, задирки і поверхневі тріщини. Деталі, які працюють за високих температур крім зношування піддаються дії газової корозії та жолобленню. Переважна більшість несправностей з'являється внаслідок природного зношування. Під час аварійних пошкоджень виникають тріщини, відколи, обломи, глибокі борони, задирки, погнутість і скрученість, тобто дефекти, які є наслідком порушень правил технічної експлуатації автомобілів, та за нормальних умов експлуатації не повинні виникати. Авторемонтні підприємства виконують важливу державного значення роботу: ремонтуючи автомобілі, вони не тільки здійснюють заміну деталей, що вийшли з ладу, але відновлюють

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*освіти : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції
здобувачів вищої освіти та молодих вчених. – Харків: ХНАДУ. – 2021. – С.
315-318. – Режим доступу:
<http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/10282>*

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Клапанний механізм газорозподілу складається з розподільного (кулачкового) вала (одного або декількох) з механізмом урухомлення, тарілчастих клапанів для закривання-відкривання впускних і випускних отворів у камерах згоряння та передавальних ланок (штовхачів, штанг, коромисел, елементів регулювання, клапанних пружин.)

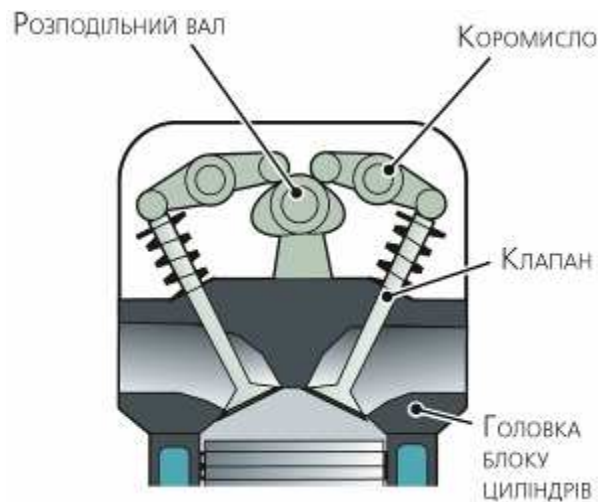


Рисунок 1.2 - Клапанний механізм газорозподілу

Коромисло є ланцюгом плоского механізму, який утворює обертову пару з нерухомою віссю, але не може здійснювати повний оберт навколо цієї осі. Має вигляд двоплечевого важеля і здійснює коливальні рухи. В двигунах внутрішнього згоряння коромисло клапана використовують для перетворення руху розподільчого вала у відкриття і закриття клапанів (рис. 1, 2) [3]. Коромисло змінює напрямок переданого руху, передає зусилля від штанги до клапана і становить нерівноплечний важіль Його зазвичай встановлюють, коли розподільний вал один, а клапанів на циліндр два або чотири, але розташовані вони особливим чином. Коромисла встановлюють на бронзових втулках або без втулок на осях, які за допомогою стояків

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>					11

закріплені на голівці блоку. Одне плече коромисла розташовується над стрижнем клапана, а інше — під або над кулачком розподільного вала. Плече коромисла з боку клапана приблизно в півтора раза довше, ніж із боку штанги штовхача. Це не тільки зменшує хід штовхача та штанги, а й знижує сили інерції, які виникають під час їхнього руху, що підвищує довговічність деталей приводу клапанів. Для регулювання зазору між стрижнем клапана і коромислом. В кінець останнього вкручений регулювальний гвинт із контргайкою.

Коромисло карбюраторних двигунів розташовано на спільній порожнистій осі, у кінці якої запресовано заглушки, що дає змогу підводити оливу до бронзових втулок коромисел і сферичних наконечників регулювальних болтів. Осі разом із коромислами встановлюють на кожній головці циліндра за допомогою стояків. [8]. На дизелях осі коромисел виконано як одне ціле із стояками, кожне коромисло коливається на своїй осі (рис.1.3).

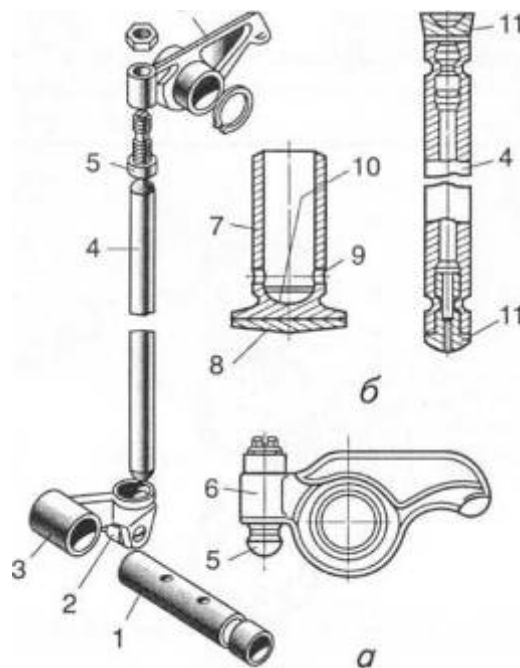


Рисунок 1.3 - Деталі приводу клапанів дизелів:

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

a — ЯМЗ; *б* — КамАЗ; *1* — вісь; *2* — ролик; *3, 7* — штовхачі; *4* — штанга; *5* — регулювальні гвинти; *6* — коромисла; *8* — торцева поверхня штовхача; *9* — отвір для зливання оливи; *10* — сферична поверхня штовхача; *11* — сферичні наконечники

За принципом здійснення своїх функцій ГРМ може бути реалізований наступними типами механізмів:

- **клапанним**, коли впуск і випуск визначається моментом і тривалістю відкриття клапанів;
- **гільзовим (система Найта)**, коли гільза циліндра у результаті свого ковзного поздовжнього або повертального руху відкриває-закриває впускні-випускні канали;
- **поршневим (щілинним)**, у якому сам поршень відкриває і закриває вікна (щілини) до каналів впуску та випуску;
- **комбінованим (поршнево-клапанним)**, коли суміш подається вікнами у циліндри, а випуск робиться через клапани [5].

1.2. Будова клапанного механізму газорозподілу

Клапанний механізм газорозподілу складається з розподільного (кулачкового) вала (одного або декількох) з механізмом переміщення тарілчастих клапанів для закривання-відкривання впускних і випускних отворів у камерах згоряння та передавальних ланок (штовхачів, штанг, коромисел, елементів регулювання, клапанних пружин, засобів повертання клапанів тощо) (рис.1.4).

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

коромисло виконують нерівноплічним. Поверхню бойка коромисла і поверхню регулювального гвинта, що контактує з наконечником штанги, термічно обробляють і шліфують для підвищення їх надійності та зносостійкості. В отвір маточини коромисла запресовують бронзову втулку (двигуни автомобілів ГАЗ -24 «Волга», ГАЗ -63А, ЗІЛ -130 КамАЗ-5320 і ін.) Кільцева канавка на внутрішній поверхні призначена для розподілу масла і подачі його до регулювального гвинта. У короткому плечі коромисла є отвір, по якому надходить масло до гвинта. Гвинт має кільцеву канавку і канал, що підводить масло до наконечника штанги (рис.1.5; 1.6) [4].



Рисунок 1.5 - Коромисло з віссю в центрі і бойком



Рисунок 1.6 - Коромисла з віссю на кінці (пара ковзання)

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.3.1. Конструктивні особливості коромисла

На короткому плечі коромисла є отвір з нарізною, куди вкручується гвинт і регулюється таким чином величина теплового зазору. Відносно корпусу коромисла гвинт фіксується контргайкою. Довге плече коромисла закінчується бойком, яким коромисло натискає на стрижень клапана. Поверхня бойка ширша від іншої частини коромисла. В середній частині коромисла є отвір для встановлення його на валик коромисла, в цей отвір запресовується бронзова втулка. Головка регулювального гвинта загартована і має сферичну заглибину або кулясту форму для відповідного наконечника штанги. З боку різьбового торця у гвинті є проріз для викрутки, а в середині болта — канал і проточка для підведення масла до наконечника штанги.

Коромисла встановлюють на осі, яку виконують у вигляді пустотілого валика. Валик на стояках кріпиться до головки блока циліндрів. Від поздовжнього переміщення на валику коромисла фіксуються розтискними пружинами, поздовжнє переміщення валика відносно стояків обмежується стопорними кільцями. Коромисло в клапанному механізмі належить до деталей, які виконують передавальну функцію. Під час роботи зазнає тертя, що спричиняє його знос (рис.1.7).



Рисунок 1.7 – Коромисло (а) та механізм коромисел в зборі (б) двигуна Д-240 (МТЗ-80)

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Коромисла встановлюють на вісі коромисел, яку виконують у вигляді пустотілого валика. Валик на стояках кріпиться до головки циліндра. Від поздовжнього переміщення на валику коромисла фіксуються розтискними пружинами, поздовжнє переміщення валика відносно стояків обмежується стопорними кільцями [5].

1.4. Аналіз умов експлуатації коромисла

Коромисло в клапанному механізмі належить до деталей, які виконують передавальну функцію. Під час роботи зазнає тертя, що спричиняє його знос та працює у напруженому стані під дією, циклічних, динамічних навантажень. Для надійної роботи за таких умов матеріал коромисла повинен мати високі показники міцності ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,в}$), утомної міцності (σ_{-1}), та ударної в'язкості, особливо роботи розвитку тріщини (КСр), тобто високу конструкційну міцність та твердість. Коромисло після експлуатації (рис.2.1).



Рисунок 2.1. Коромисло після експлуатації

Довговічність такої деталі як коромисло залежить від зносостійкості, яка в свою чергу залежить від твердості поверхні. Серцевина виробу для забезпечення високої конструкційної міцності вимагає значно меншої твердості, але вищих показників пластичності та в'язкості. У деталях, які працюють в умовах тертя необхідно забезпечити різні властивості поверхні і серцевини. Підвищення твердості поверхні може бути досягнуто поверхневим гартуванням або хіміко - термічною обробкою (цементациєю, нітроцементациєю, азотуванням).

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Для деталей, які піддають поверхневому зміцненню важливо забезпечити загальний рівень навантажень та їх характер, що зумовлює вимоги до властивостей серцевини виробу. Для такої деталі як коромисло, яке піддається дії ударних та циклічних навантажень необхідно забезпечити високі показники міцності, утомної міцності, пластичності, ударної в'язкості. Такий комплекс властивостей по всьому перерізу деталі може бути досягнутий при достатньому прогартовуванні. Марку сталі вибираємо з урахуванням критичного діаметра сталі. Критичний діаметр залежить переважно від вмісту легуючих елементів, отже легованість сталі залежить від перерізу деталі. Так як коромисло переважно працює на знос, то наскрізна прогартовуваність не потрібна, достатньо щоб критичний діаметр дорівнював $D_{кр.} = 0,25 R_{дет.}$ Для деталі «коромисло» згідно умов роботи не вимагають високої міцності серцевини, отже для її виготовлення можна вибрати вуглецеву сталь.

1.5. Матеріали для виготовлення коромисла

Коромисла виготовляють з середньо вуглецевих, легованих сталей та ковкого чавуну. Основні марки сталей для виготовлення коромисла: сталь 35, 40, 45, 40X, 45XP , сплави титану.

1.6. Методи зміцнення коромисла

Робочу поверхню бойка для зменшення зношування піддають цементації, гартуванню (СВЧ), шліфуванню. Цементация дозволяє отримати науглецьований шар глибиною 0,5 - 2мм. Після нітроцементації глибина насиченого шару 0,4-1 мм. Гартування з наступним низьким відпуском підвищує показники міцності та зносостійкості. Твердість поверхнього шару 58- 62 HRC, серцевини 28- 40 HRC.

					<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>18</i>

РОЗДІЛ 2 . ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

2.1. Методи зміцнення деталей ГРМ

Згідно технічним умовам коромисло ГРМ для тривалої експлуатації та надійної роботи виготовляють з середньовуглецевих сталей 35, 40, 45, та легуваних 35, 40, 45, 40X, 45XP і піддають термічній обробці – нормалізації для зміцнення деталі по об'єму. Бойки зміцнюють поверхневим гартуванням чи цементацією. Поверхнєве гартування проводять з використанням лазерного випромінювання, чи індукційним нагріванням. Ефективність проведення зміцнювальної обробки ілюструє таблиця 2.1

Таблиця 2.1. Вплив виду обробки на зносостійкість сталей [7]

Вид обробки	Коефіцієнт тертя, fтр.	Інтенсивність І зношування, мм ² /м
Поліпшення	0,42	$3,1 \times 10^{-6}$
Нормалізація	0,44	$2,4 \times 10^{-6}$
Лазерне гартування	0,39	$4,6 \times 10^{-7}$
Індукційне гартування	0,38	$1,8 \times 10^{-6}$

2.1.1. Гартування лазерним випромінюванням.

При лазерному гартуванні джерелом випромінювання є газові CO₂ – лазери неперервної дії. Особливістю лазерного гартування є дуже висока концентрація енергії в тонкому (до 1 мм) поверхневому шарі. Цей шар за дуже короткий час нагрівається до високих температур, а об'єм деталі залишається холодним. Коли нагріта ділянка виходить із зони дії променя, вона дуже швидко охолоджується внаслідок відводу тепла в сусідні холодні

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2318103.000 ПЗ				

нагрівання завдяки високій концентрації енергії в тонкому шарі та більш швидкому охолодженні (завдяки прилеглим холодним шарам).

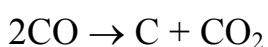
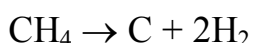
2.1.2. Зміцнення поверхні виробів цементациєю

Цементация належить до хіміко-термічної обробки (ХТО). Поєднує вплив нагрівання зі зміною хімічного складу поверхневих шарів насиченням їх одним, або декількома елементами. Основними найбільш поширеними видами ХТО є цементация, ціанування, азотування, борування тощо.

Цементация – процес насичення поверхневого шару виробу вуглецем. Цементации піддають деталі, які повинні мати високу твердість, зносостійкість поверхні та в'язку серцевину. Цементують зубчасті колеса, пальці, черв'яки, валики. Ці деталі виготовляють з низьковуглецевих сталей, які містять до 0,3 % вуглецю (сталь 10, 20, 20Х, 20ХР, 15ХФ, 12ХНЗА, 18ХГТ). Поверхневий шар насичують вуглецем до концентрації 0,8-1,0 % С. Глибина насичення 0,5 - 2,5 мм. Кількість вуглецю змінюється від поверхні вглиб до вихідного значення. Структура сталі відповідно змінюється від (П+ЦII) на поверхні до П і (П+Ф) вглиб деталі. Кількість фериту зростає при наближенні до центру (Рис.6.9). Враховуючи, що аустеніт максимально розчиняє до 2,14 % С, а ферит тільки до 0,025 % С, цементацию проводять при температурах вищих за A_{C_3} - (930-950 °С). Насичуючим середовищем при цементации може бути твердий, газоподібний чи рідкий карбюрізатор (носій вуглецю). Газоподібний карбюрізатор містить 92 - 96 % метану (СН₄) та деяку кількість окису вуглецю (СО).

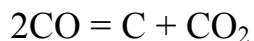
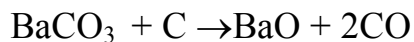
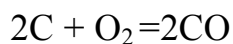
деяку кількість окису вуглецю (СО).

При газовій цементации відбуваються такі реакції:



					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Твердий карбюрізатор складається з деревного вугілля з додатком вуглекислих солей барію або натрію (75-85 % березового вугілля, 20-30 % $BaCO_3$ або Na_2CO_3). В процесі цементації відбуваються такі реакції:



Атоми вуглецю, що утворилися в результаті цих реакцій, потрапляють в кристалічну ґратку γ -заліза і завдяки дифузії проникають на певну глибину в поверхневі шари деталей.

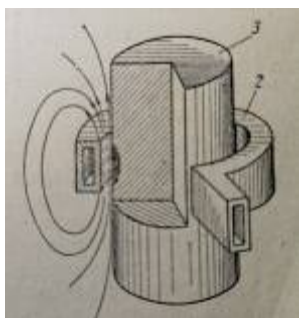
Рідкий карбюрізатор складають розплави солей (75-80 % Na_2CO_3 , 15 % $NaCl$ і 6-10 % SiC).

При газовій цементації можна досягти утворення науглецьованого шару завтовшки 0,5-1,0 мм за 6-8 годин; при використанні рідкого карбюрізатора цементований шар глибиною 0,1-0,2 мм утворюється за 30-40 хв. Після цементації вироби піддають гартуванню та низькому відпуску. На поверхні формується структура мартенситу відпуску з твердістю HRC 60...62., а в серцевині сорбіт з твердістю HRC 26...28 [12,13].

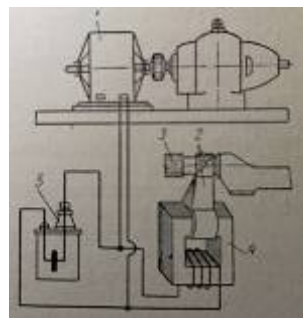
2.1.3. Зміцнення індукційним нагріванням струмом високої частоти

Високочастотне нагрівання базується на тому, що індуктор, по якому проходить струм, створює перемінне електромагнітне поле, яке викликає в сталевій чи чавунній деталі вихрові струми, які нагрівають деталь (рис. 2.1).

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 2.2 - а) Індуктор з деталлю (стрілками показано напрямок магнітного потоку); б) Установа для високочастотного гартування:

генератор високої частоти; 2- індуктор; 3- деталь;

4 – трансформатор; 5 - батарея конденсаторів

Схематично принцип дії високочастотної установки для нагрівання виробів зображено на рис.2.3 Виріб 3 , який розміщено в індукторі 2, нагрівається струмом високої частоти і потім охолоджується водою, яка надходить з охолодника (спреєра 4) . Загальний вигляд індукторів для нагрівання деталей різної форми показано на рис. 2.4. [14, 15].

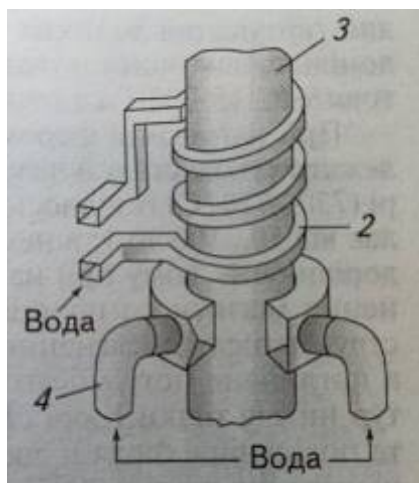


Рисунок 2.3 – Варіант розміщення індуктора і спреєра:

2 – індуктор; 3 – деталь; 4 – спреєр.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРТАМ 2318103.000 ПЗ

Арк.

23

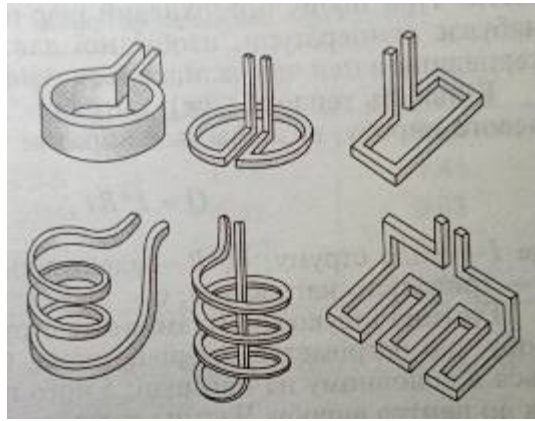


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд основних типів індукторів для нагрівання
циліндричних та плоских поверхонь

Особливістю нагрівання струмом високої частоти є те, що вихрові струми поширюються по поверхні металу. Глибина їх проникнення δ в мм залежить від частоти струму в індукторі f Гц та властивостей металу, який нагрівають - його питомого електричного опору ρ в Ом /м та магнітної проникності M Гс/м:

$$\delta = 4,46 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}},$$

де δ – глибина нагрівання, м;

ρ – питомий електричний опір, Ом·м;

μ – магнітна проникність, Гс/м;

f – частота струму, Гц.

Частота струму при індукційному нагріванні може мати значення від 500 до 1 000 000 Гц. Рекомендовані частоти струму для заданої глибини нагрітого шару можна вибрати згідно рекомендацій таблиці 2.1.

Глибина проникнення для сталі 45 і міді при різних частотах і температурі показана в табл. 2.2. [16, 18].

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Таблиця 2.2. Глибина проникнення струму (в мм) в нагрітий метал.

Частота струму	Сталь 45		Червона мідь
	20°C	850 °C	20°C
50	3,2	90	10
2000	0,5	14	1,6
10000	0,2	6,5	0,7
200000	0,05	1,4	0,16
1000 000	0,02	0,6	0,08

Для індукційного нагрівання використовують обладнання показане на рис. 2.5. Установка для високочастотного гартування складається з таких елементів:

1 – генератора високої частоти; 2 – високочастотного трансформатора; 3 – конденсаторної батареї; 4 – індуктора і пристосування для охолодження ; 5 – пристосування для управління циклом обробки і контролю температури.

В якості генераторів високої частоти для індукційного гартування використовують машинні генератори з частотою 500 – 10 000 Гц з потужністю 7,5 – 2000 КВт. Машинні генератори використовують для поверхневого гартування на глибину 2 -5 мм великих і малих валів, пальців, шийок колінчастих валів, розподільчих валів, шліцевих валів, гільз циліндрів, втулок та інших, для плавлення сталі, бронзи і латуні, а також для ковальського нагрівання і пайки. К.К.Д. установок з машинними генераторами сягає 65 %.

Лампові генератори виготовляють для частот від 70 000 до 5 000 000 Гц і вище, потужність від 1,5 до 300 кВт при к.к.д. до 45 %. Їх використовують для гартування на невелику глибину (до 2 мм) дрібних деталей (коромисел, поршневих пальців) та інструменту, різьбонарізного інструменту, фрез тощо.

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Результати зміцнення при індукційному нагріванні залежать від багатьох факторів – властивостей матеріалу у вихідному стані і загартованому, конфігурації виробу, його розмірів тощо. Найбільший ефект досягається на деталях, що мають на поверхні концентратори напружень, так як при правильному виборі режиму зміцнення можливо повністю усунути шкідливий вплив концентраторів і забезпечити додаткове зміцнення за рахунок створення у виробах сприятливого розподілу залишкових напружень. [19-21].

2.2. Основи індукційного нагрівання

2.2.1. Вплив високочастотного гартування на механічні властивості сталі.

Змінюючи електричні характеристики нагрівача (частоту струму, потужність) можна в деталях отримувати зміцнений шар товщиною, яка змінюється в широких межах. Вплив частоти струму на глибину нагрітої зони показано на рис 2.6.

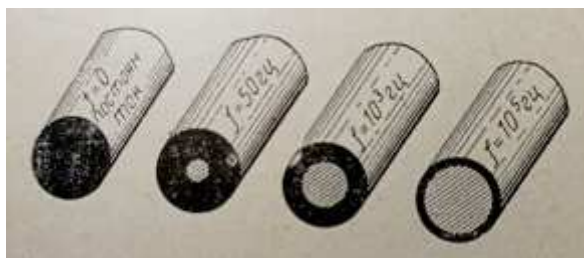


Рисунок 2.6 - Схема зміни глибини проникнення струму в провідник в залежності від частоти струму

Результати зміцнення при індукційному нагріванні залежать від багатьох факторів – властивостей матеріалу у вихідному стані і загартованому, конфігурації виробу, його розмірів тощо. Найбільший ефект досягається на деталях, що мають на поверхні концентратори напружень, так як при

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

правильному виборі режиму зміцнення можливо повністю усунути шкідливий вплив концентраторів і забезпечити додаткове зміцнення за рахунок створення у виробах сприятливого розподілу залишкових напружень. [19-21].

2.2.1. Вплив високочастотного гартування на механічні властивості сталі.

Особливістю високочастотного гартування є короткочасне нагрівання і можливість створення умов охолодження, яке забезпечує високу інтенсивність, що в значній мірі впливає на структуру загартованого шару. При поверхневому гартуванні використовують короткочасне нагрівання, щоб не допустити втрати тепла внаслідок теплопровідності в глиб виробу. Сутність процесів, які відбуваються при нагріванні не змінюються, але мають особливості. Чим вища температура нагрівання, тим більшою є рухомість атомів і тим швидше завершується процес перетворення перліту в аустеніт. З рис.2.7 видно, що при швидкому нагріванні температура повного гартування залежить від вмісту вуглецю. Для одержання однорідних властивостей деталей рекомендовано використовувати сталі зі звуженою межею за вуглецем у порівнянні з ДСТУ, для сталі 45 - 0,42- 0,45% С).

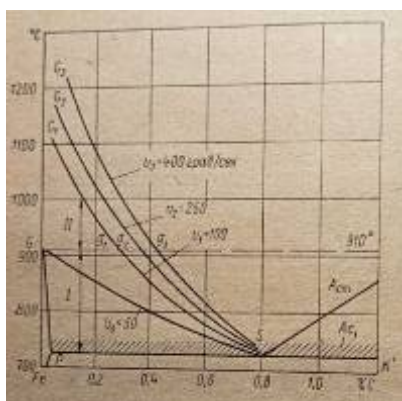


Рисунок 2.7 – Зміщення температур повного гартування доевтектоїдної сталі при зміні швидкості нагрівання:

V_0, V_1, V_2, V_3 – швидкості нагрівання в град /сек

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Заштриховано інтервал перетворення

2.2.2. Особливості фазових перетворень в сталі при нагріванні струмом високої частоти

Короткочасне нагрівання сталі до гартівних температур і протікання фазових перетворень при температурах, що значно перевищують рівноважні, сприяє формуванню механічних властивостей, які суттєво відрізняються від властивостей сталі, загартованої нагріванням від зовнішнього джерела тепла. При поверхневому гартуванні з використанням швидкого нагрівання, аустенітне зерно завжди дрібніше того, що звичайно отримують при повільному нагріванні до температури аустенізації. В умовах поверхневого гартування це є основною причиною підвищення твердості загартованого шару. Швидке нагрівання сприяє формуванню більш дрібної структури загартованої сталі, дає можливість отримати більш оптимальне поєднання міцності та в'язкості. Для отримання задовільних властивостей загартованої структури не вимагається повної гомогенізації аустеніту. Після поверхневого високочастотного гартування аустеніт завжди залишається неоднорідним. На рис. 16 показана залежність твердості загартованої сталі від вмісту вуглецю. Заштрихована ділянка характеризує той інтервал властивостей, який формується при звичайному гартуванні. Однією з причин такого широкого діапазону твердості, який можна отримати на одній і тій же марці сталі, є мікронеоднорідність концентрації вуглецю. З діаграми видно, що однакові властивості (твердість) можуть бути отримані при різних концентраціях вуглецю в мартенситі. Неоднорідність мікроструктури сталі тим більше виявляється, чим більшим вихідне зерно сталі. В цьому випадку ділянки фериту мають більші розміри і тому потребують більше часу на гомогенізацію аустеніту. Якщо попередньою термічною обробкою сформована структура сорбіту, не буде чіткої диференціації фериту і перліту,

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.2.3. Вплив умов охолодження на структуру і властивості загартованої сталі.

При поверхневому гартуванні охолодження швидке. Потреба в такому режимі охолодження зумовлена технологічними і тепловими факторами: особливістю будови аустеніту, який отримано після швидкого високочастотного нагрівання. При поверхневому нагріванні прагнуть отримати певний розподіл температур по перерізу нагрітого шару. Швидке охолодження попереджає вирівнювання тепла по перерізу виробу, дозволяє зберегти поверхневий характер нагрівання за винятком тих випадків, коли передбачається невелика пауза між нагріванням та охолодженням. Швидке охолодження дозволяє зробити сумірними тривалість нагрівання та тривалість охолодження.

Внаслідок швидкого нагрівання аустеніт зберігає неоднорідну концентрацію вуглецю і домішок інших елементів. Стійкість переохолодженого аустеніту суттєво залежить і від вмісту вуглецю, концентрації і рівномірності розподілу легуючих елементів та постійних домішок. На рис.2.9 схематично показано вплив однорідності аустеніту на положення кривих ізотермічного розпаду аустеніту. Із співвідношення кривих видно, якщо аустеніт отримано при повільному нагріванні він однорідний, його розпад з утворенням ферито-цементитної суміші в інтервалі температур мінімальної стійкості починається через період часу t_1 (крива 1).

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

концентрації вуглецю в аустеніті. Цей інтервал температур відповідає температурі відпуску мартенситу. Отже, під час охолодження мартенсит буде піддаватись відпуску - концентрація вуглецю в переохолодженому твердому розчині зменшується. Повнота відпуску залежить від температури, при якій відбувається процес та від його тривалості. На рис. 2.9 на діаграму перетворення аустеніту при неперервному охолодженні нанесені дві криві охолодження з різними швидкостями – v_1 і v_3 . Діаграму. Ці режими охолодження забезпечують отримання структури мартенситу. За даними (рис.2.10) мартенсит, отриманий при охолодженні душем, зберігає вуглецю перетворення аустеніту при неперервному охолодженні нанесені дві криві охолодження з різними швидкостями – v_1 і v_3 . в 1, 5 – 2 рази більше, ніж при охолодженні зануренням у воду [23].

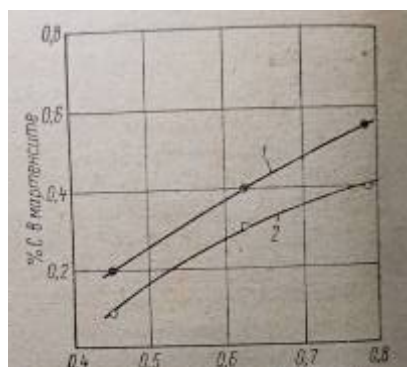


Рисунок 2.10 – Вплив інтенсивності охолодження на вміст вуглецю в мартенситі вуглецевої сталі:

1 – охолодження водняним душем; 2 – зануренням у воду.

Твердість таких зразків підвищується на 2 – 3 HRC. Крива 3 на рис. 2.11 показує рівень твердості, отриманий при охолодженні душем після індукційного нагрівання з швидкістю 10 - 100 град / сек. Додаткові 1, 5 – 2 HRC отримані внаслідок подрібнення блочної структури.

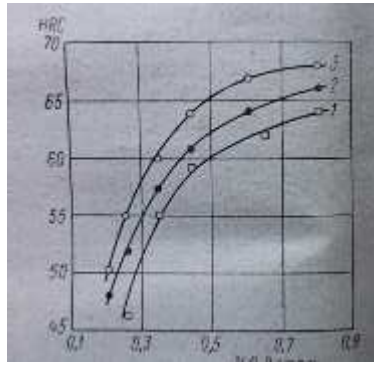


Рисунок 2.11 - Твердість мартенситу в залежності від вмісту вуглецю в сталі

1 – нагрівання в печі, $v = 1$ град /сек, охолодження зануренням у воду;

2 – нагрівання в печі, $v = 1$ град /сек, охолодження водяним душем;

3 – нагрівання індукційне $v = 10 - 100$ град /сек, охолодження інтенсивним водяним душем.

Наведені дані свідчать, що умови нагрівання та умови охолодження відіграють важливу роль у формуванні структури і властивостей поверхнево загартованої сталі. Швидке нагрівання і інтенсивне душкове охолодження можуть бути джерелом підвищення якості загартованого виробу. На деталях машин ці умови досягають поверхневим гартуванням.

2.2.4. Розподіл температури під час нагрівання при поверхневому гартуванні.

Особливістю індукційного нагрівання є те, що тепло генерується безпосередньо у виробі, тільки у поверхневому шарі.

У початковий період глибина проникнення електромагнітної енергії, яка викликає нагрівання (глибина проникнення струму) дуже мала. При досягненні температури втрат феромагнітних властивостей (точка Кюрі) глибина проникнення струму збільшується в декілька разів (Табл.2.3). Це впливає на кінетику розповсюдження тепла в глиб виробу.

Таблиця 2.3. Глибина проникнення струму в метал при різних частотах.

Частота струму, Гц	Глибина проникнення , мм		
	Мідь при 15°C	Сталь при 15°C $m = 10 - 40$	Сталь при 800°C $m = 1$
50	10,0	10,0 – 5,0	70,8
500	3,0	3,0 – 1,5	22,0
2500	1,3	1,5 – 0,7	10,0
10 000	0,7	0,70 – 0,35	5,0
50 000	0,3	0,30 – 0,15	2,2
250 000	0,13	0,15 – 0,07	1,0
450 000	0,1	0,11 – 0,05	0,7

Якщо у початковий період переважає поверхневе нагрівання і температура різко спадає по кривій, яка має експоненціальний характер (рис.2.12, крива 1), то при досягненні поверхнею точки Кюрі ріст температури поверхневих шарів уповільнюється і крива буде мати перегин (крива 2).

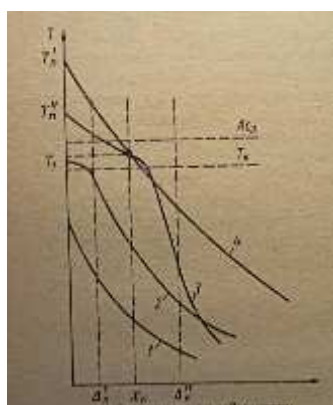


Рисунок 2.12 - Розподіл температури T по перерізу виробу при поверхневому індукційному нагріванні (схема):

T_k – точка Кюрі; δ_k - глибина проникнення струму в гарячий метал; T_1 – температура на глибині загартованого шару x_k ; T_n - температура на поверхні;

1 – початкова стадія нагрівання; 2 - розподіл температур при досягненні на поверхні точки Кюрі; 3 – кінцевий розподіл температури при нагріванні струмом звукової частоти ($x_k < d_k$); 4 – те саме при нагріванні струмом

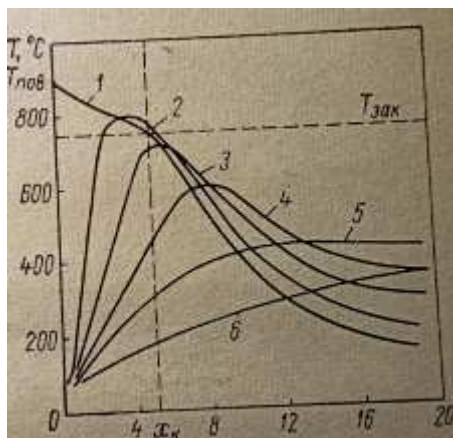
Глибина проникнення струму буде збільшуватись доти, доки не досягне значень, коли практично вся енергія, що підводиться, буде поглинатись у гарячому магнітному шарі. Таку глибину називають гарячою глибиною проникнення струму в метал d_k . гаряча глибина проникнення струму також залежить від частоти струму (табл.2.3), і перегин на кривій 2 буде тим ближче до поверхні виробу, чим вищою є частота струму. Особливістю поверхневого індукційного нагрівання є те, що в нагрітому шарі буде невеликий перепад температури і при правильно вибраних частоті струму та електричному режимі нагрівання цей перепад не буде виходити за межі допустимого інтервалу температур. Ця умова виконується у випадку, якщо глибина прогрівання не перевищує гарячу глибину проникнення струму. Більш глибоке прогрівання можливе внаслідок теплопровідності. На рис. 2.12 схематично показані співвідношення і форма різних кривих розподілу температури по глибині нагрітого шару при різних частотах струму. Порівнюючи криві, бачимо, що використання високих частот для поверхневого нагрівання доцільно тільки для невеликої глибини загартованого шару. Глибина загартованого шару не повинна перевищувати 1, 3 – 1,5 мм. При гартуванні більшості конструкційних і інструментальних сталей нагрівання ведеться зі значним перевищенням точки Кюрі. Потрібна температура має бути досягнута на певній глибині.

2.2.5. Розподіл швидкостей охолодження по перерізу виробу при поверхневому гартуванні.

Використання водяного душу забезпечує майже миттєве досягнення поверхнею температури охолоджувального середовища. Градієнт температур

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2318103.000 ПЗ				

в напрямку до поверхні при душовому методі охолодження завжди значно більший, ніж в напрямку до серцевини, так як на поверхні підтримується весь час температура середовища. В напрямку до серцевини перед початком охолодження відсутній різкий спад температури (рис.2.13), а під час охолодження градієнт температури буде зменшуватись. Із графіків (рис.2.13) видно, що максимум на кривих розподілу температур у початковий період охолодження зсувається в гліб виробу, тобто під час охолодження продовжується нагрівання внутрішніх шарів. Температура деяких зон може піднятиь вище за гартівні (крива 2). Якщо охолодження не миттєве, то розповсюдження тепла в гліб виробу буде більш суттєвим.



Відстань від поверхні, мм

Рисунок 2.13 - Розподіл температури по перерізу поверхнево нагрітого циліндра в період охолодження (схема)

1 – закінчення нагрівання; 2 – 6 - етапи охолодження; x_k – глибина загартованого шару.

2.2.6. Розподіл структури і твердості по перерізу поверхнево загартованого виробу

Розподіл структури і властивостей по перерізу поверхнево загартованого виробу залежить від розподілу температури в кінці нагрівання і вихідної структури сталі, яка залежить від складу сталі та її попередньої термічної обробки (рис. 2.14).

						МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			37

Зона 1 – нагріта вище гартівної температури, швидко охолоджена структуру має структуру мартенситу. Твердість в межах цього шару змінюється несуттєво і залежить від вмісту вуглецю в сталі. В конструкційній сталі з вмістом вуглецю 0,4 – 0,5 % поблизу поверхні утворюється мартенсит середньоголчастий бал 8 – 10.

Зона II – перехідна від загартованої до вихідної структури. В цій зоні кількість мартенситу зменшується від 100% до 0. При віддалені від поверхні збільшується кількість фериту і поблизу внутрішньої границі перехідної зони з'являються ділянки перліту, які свідчать, що температура в цій зоні не перевищувала критичної температури A_{c1} .

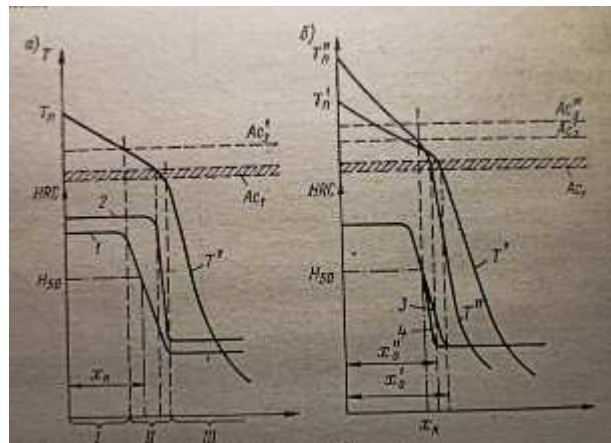


Рисунок 2.14 - Розподіл температури T і твердості HRC по перерізу поверхнево загартованого виробу з різним вмістом вуглецю в сталі (а)- і різних режимах нагрівання (б)

x_k - глибина шару до H_{50} ; x_0 - до вихідної структури. Розподіл твердості; 1 і 3 – доевтектоїдна сталь, режим – A_{c3}' і T ; 2 – той самий режим для заевтектоїдної сталі.

4 – доевтектоїдна сталь, нагрівання з великою потужністю.

Рекомендовано визначати глибину поверхневого загартованого шару (подібно до прогартовуваності), як відстань (x_k) від поверхні до зони, яка містить 50 % мартенситу, (x_0) – загальна глибина загартованої зони.

Твердість сталі з структурою, яка містить 50% мартенситу залежить від вмісту вуглецю в сталі (рис.2.8).

2.3. Відпуск поверхнево загартованих деталей

Деталі після поверхневого гартування піддають низькому відпуску з нагріванням у печах. Індукційне нагрівання використовують переважно для тонкостінних деталей, коли рівномірне прогрівання по перерізу можна досягти за короткий час. На рис. 2.15 наведена крива 3 зміни твердості зразка сталі 45 при проведенні відпуску в печі після об'ємного гартування [7]. Крива 1 характеризує рівень твердості поверхнево загартованих зразків. Криві показують, що зразки, які загартовані при об'ємному нагріванні, зберігають вихідну твердість до 150 – 160°C, у поверхнево загартованих зразків твердість починає зменшуватись вже при нагріванні до 100 – 120°C. Зниження твердості поверхнево загартованих зразків пояснюється розпадом мартенситу, що супроводжується локальним зменшенням питомого об'єму поверхневого шару і частковим зняттям в ньому залишкових стискаючих напружень. Зміни в мартенситі у зразків, загартованих з об'ємним нагріванням, при цих температурах не така інтенсивна, тому що початкова стадія розпаду тетрагонального мартенситу в цих зразках відбувається ще в період охолодження при гартуванні, яке є менш інтенсивним, ніж при поверхневому гартуванні. При температурах 150 -160 °C властивості мартенситу, отриманого за різних умов, стають ідентичними і подальше зниження твердості підкоряється однаковій закономірності.

Під час відпуску поверхнево загартованих виробів твердість зменшується переважно в межах шару x_k , де структура переважно мартенситна. На глибині x_k твердість при низькому відпуску практично не змінюється. Це дозволяє користуватись кривою H_{50} на рис. 2.8 для визначення глибини

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загартованого шару після низького відпуску. Визначену твердість досягають при нагріванні до досить невеликого інтервалу температур.

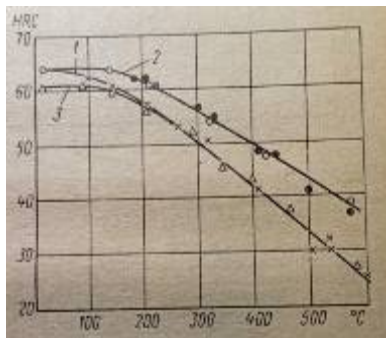


Рисунок 2.15 – Залежність твердості поверхнево загартованих виробів від режиму відпуску різними методами:

Температура відпуску вибирається з коливанням $+10^{\circ}\text{C}$ у вибраних межах. 1 – звичайний відпуск (-x-); 2 – електровідпуск (-o-) і само відпуск (-o-); 3 – рівень твердості після об'ємного гартування з нагріванням у печі (-^)

2.4. Способи поверхневого високочастотного гартування.

Розрізняють три основних типи процесів: 1 – одночасне нагрівання усієї поверхні деталі (наприклад, поверхні дрібних деталей рис.2.16 , а); 2 – послідовне нагрівання і охолодження окремих ділянок поверхні деталі (наприклад, шийок колінчастого вала, рис.2.16. б); 3 – неперервно – послідовне нагрівання і охолодження при нерухомому індукторі з переміщенням деталей, наприклад, довгих прутків і валів.

часу (від часток секунд до декількох секунд) до температур 800 – 900 °С. Поверхневий шар нагрівається до заданої температури, а серцевина залишається не нагрітою.

Швидкість нагрівання виробів СВЧ залежить від питомого електричного опору та магнітної проникності сталі. Цим користуються при нагріванні виробів, ураховуючи зміну їхніх фізичних властивостей і фазових перетворень під час нагрівання. Глибину проникнення струму під час нагрівання виробів з феромагнетиків наведено в табл. 2.3, а розподіл температури по перерізу виробу показано на рис. 2.12.

При виборі частоти струму, крім глибини шару, який нагрівається, потрібно враховувати форму та розміри деталі і прагнути до одержання найбільшого електричного к.к.д. індуктора, зменшенню питомих витрат в ньому і відповідно, до підвищення к.к.д. установки. Тільки правильний вибір частоти в певних межах забезпечує високу якість поверхневого гартування. Чим вища частота струму, тим менша глибина прогрівання і менший діаметр деталі, економічно вигідний для гартування (табл.2.4).

Таблиця 2.4. Вибір частоти струму

Частота, Гц	Глибина нагрітого шару, мм	Найменший економічно вигідний діаметр виробу, мм
1000	3,5 - 20	44
2000	2,3 - 15	32
8000	1,2 - 8	16
200 000	0,3 – 1,5	2

При нагріванні сталі відбувається ріст зерна аустеніту. Оскільки цей процес дифузійний, його швидкість залежить від температури та тривалості

нагрівання сталі. Нагрівання струмом високої частоти позитивно впливає на цей процес, хоча температури нагрівання при цьому вищі. Внаслідок того, що швидкість нагрівання сталі СВЧ висока, а витримка при високій температурі відсутня, дійсні розміри аустенітного зерна значно менші, ніж при пічному нагріванні

Швидкість нагрівання виробів СВЧ залежить від питомого електричного опору та магнітної проникності сталі. Цим користуються при нагріванні виробів, ураховуючи зміну їхніх фізичних властивостей і фазових перетворень під час нагрівання. Глибину проникнення струму під час нагрівання виробів з феромагнетиків наведено в табл. 2.2, а розподіл температури по перерізу виробу показано на рис. 2.17. Найсприятливіший розподіл температури по перерізу виробу буде при нагріванні, що відповідає умовам кривої 3, оскільки в межах заданої глибини температура виробу змінюється незначно. Тому його гартування буде найбільш якісним з однорідною структурою по всій глибині виробу. При нагріванні, яке відповідає умовам кривої 4, температура виробу в межах нагрітого шару змінюється різко, що веде до перегрівання поверхневих шарів виробу.

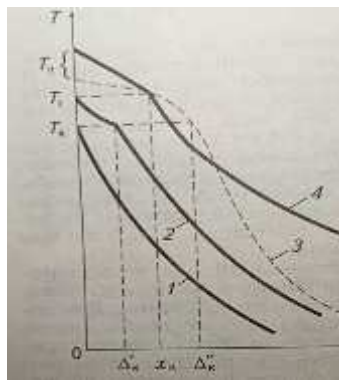


Рисунок 2.17 - Розподіл температури по перерізу виробу.

T_k – точка Кюрі; T_g - температура гартування; T_p – температура поверхні:

Δ_{κ}' - глибина проникнення струму радіочастоти в гарячий метал; x_{κ} – глибина загартованого шару; Δ_{κ}'' - глибина проникнення струму звукової

2.5. Залишкові напруження в поверхнево загартованих виробах.

При нагріванні та охолодженні завжди виникає нерівномірність розподілу температури по перерізу: при нагріванні поверхневі шари завжди мають більш високу температуру, ніж шари, віддалені в глибину виробу; при охолодженні – навпаки. Наслідками цього є неоднорідність теплового об'ємного розширення чи стискання, неоднорідність фазових перетворень в металі. Внутрішні напруження сприяють появі деформації, виникненню тріщин, та зменшують утомну міцність. Внутрішні напруження в залежності від їх походження поділяють на теплові, причиною виникнення яких є нерівномірність температури, та структурні, які виникають під час фазових перетворень, які супроводжуються зміною питомого об'єму.

На характер розподілу та величину залишкових напружень при поверхневому гартуванні впливають такі фактори: глибина загартованого шару; відношення глибини загартованого шару до радіусу виробу; режим нагрівання, тобто характер розподілу температури по перерізу виробу по закінченню нагрівання; умови охолодження ; склад сталі; попередня термічна обробка. Збільшення глибини загартованого шару сприяє зсуву максимуму напружень розтягу в глиб виробу. Так, при збільшенні загартованого шару з 1 мм до 4 забезпечило зниження залишкових напружень стискання на поверхні зразків з 480 до 200 МПа. Якщо глибина більша за $0,1R$ стискаючі напруження на поверхні зменшуються. Залишкові напруження розтягу на границі загартованого шару при зменшенні відносної глибини загартованого шару монотонно зменшуються.

Режим охолодження впливає на залишкові напруження так як він визначає будову загартованого шару. При охолодженні душем практично завжди утворюється структура мартенситу в загартованому шарі.

Склад сталі та вихідна структура впливають на теплостійкість (температуру, до якої зберігається високе значення межі текучості сталі, і температуру

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початку мартенситного перетворення, від якої залежить повнота його завершення та об'ємний ефект перетворення. Вплив цих факторів на величину залишкових напружень схематично представлено порівняльними кривими зміни напружень на поверхні зразка під час нагрівання і охолодження поверхневого шару (рис.2.18). Крива 1 для нелегованої середньо вуглецевої сталі, яка втрачає міцність при досить низьких температурах. При охолодженні напруження розтягу будуть виникати вже при досить низьких температурах, коли сталь стає непластичною. Отже, максимальне значення напружень розтягу буде невеликим.

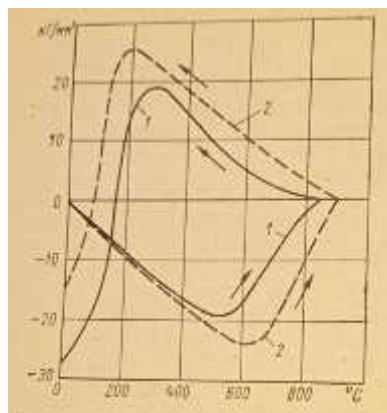


Рисунок 2.18 – Схема виникнення залишкових напружень у вуглецевій (1) та легованій (2) сталі при поверхневому гартуванні

Крива 2 характеризує зміну напружень під час нагрівання і охолодження легованої сталі, яка зберігає твердість до більш високих температур. Легована сталь після гартування має значну кількість залишкового аустеніту, об'ємний ефект від фазових перетворень буде меншим, ніж у вуглецевої сталі. У легованої сталі будуть меншими стискаючі залишкові напруження в загартованому шарі. Попередня термічна обробка суттєво впливає на величину стискаючих напружень в загартованому шарі (рис.2.19).

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Як свідчать результати досліджень [9] гартування нагріванням струмом високої частоти має певні переваги та недоліки перед гартуванням з нагріванням у печі.

1. Можливість витратити енергію на нагрівання тільки потрібної частини виробу. Наприклад, у колінчастого вала поверхневий шар шийок складає лише 1-2 % від загального об'єму метала. Нагрівання в печі вимагає нагрівання самої печі, її атмосфери і прогрівання усього об'єму метала. Можна додати втрати тепла у зовнішнє середовище. Тому навіть при високих тарифах на електричну енергію та низькому к.к.д. установок індукційне нагрівання буде значно дешевшим за нагрівання у печі.

2. Індукційне гартування забезпечує високу якість термічної обробки. Тепло утворюється в металі виробу за дуже короткий проміжок часу, що зменшує можливість перегрівання, росту зерна та знеуглецювання. Кількість можна точно дозувати, тому процес відбувається за сталими параметрами і піддається автоматизації. При високочастотному нагріванні зменшується жолоблення виробів і не утворюється окалина. В наслідок чого не потрібно проводити очистку від окалини.

3. Вибором потрібного режиму високочастотного поверхневого гартування можна створити сприятливий розподіл залишкових напружень, отже напруження стискання на поверхні виробів, що значно підвищує межу їх витривалості під час згину і кручення.

4. Впровадження високочастотного поверхневого гартування дозволяє замінити дорогі леговані сталі на більш прості і дешеві, не зменшуючи властивості виробу.

5. Поверхневе гартування у багатьох випадках може замінити трудомісткі процеси зміцнення такі як цементация.

6. Індукційне нагрівання має високу продуктивність. Наприклад, операція поверхневого нагрівання триває 2 -15 сек . Установки для високочастотного нагрівання можна розміщувати в загальному потоці механічної обробки.

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

7. Індукційне нагрівання вимагає виготовлення індуктора для кожної деталі, проведення спеціальних досліджень для вибору оптимального режиму обробки.

Висновки. Індукційне нагрівання деталей для гартування у порівнянні з нагріванням у печах має багато переваг, що є причиною більш широкого його впровадження у ремонтному виробництві.

Постановка задачі.

Враховуючи, що коромисло є відповідальною деталлю клапанного механізму ГРМ і повинне мати високу твердість поверхні бойка в поєднанні з в'язкою серцевиною, доцільно розробити технологічний процес поверхневого гартування з нагріванням струмом високої частоти бойка коромисла, виготовленого із сталі 45 та відновленого під час ремонту проведенням механічної обробки для усунення слідів зношування.

Гартування струмом високої частоти дозволяє одержати твердість загартованої поверхні на 2 - 4 одиниці HRC вище ніж після цементації, практично запобігти жолобленню та деформації деталі.

					<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Методика проведення експериментів

3.1.1. Мікроструктурний аналіз

Мікроструктурний аналіз проведено з використанням металографічних мікроскопів МИМ- 10, ММР, який дають збільшення від 70 до 1440 раз. Сучасний цифровий мікроскоп представлено на рис. 3.1 Цифрові мікроскопи використовують для контролю якості готової продукції в багатьох галузях промисловості.



Рисунок 3.1 - Цифровий мікроскоп XS - 3330 LED MICRO med

Мікроструктури сталі після різних видів обробки вивчалась на мікрошліфах згідно ДСТУ 9074 – 2021, величну зерна визначали за ДСТУ 8972-2019, наявність знеуглецьованого шару досліджена за ДСТУ8967 – 2019. Твердість зразків сталі після різних видів обробки виміряна на приладі Твердомір ТР -5006, який дозволяє визначати твердість за методом Брінелля та методом Роквелла (ДСТУ ISO 6506 – 1: 2007, ДСТУ ISO 6508 – 1 : 2013). Гартування з індукційним гартуванням проведене з використанням обладнання (рис.3.2). В якості генераторів високої частоти для індукційного гартування використовують машинні генератори з частотою 500 – 10 000 Гц з

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

потужністю 7,5 – 2000 кВт. Машинні генератори призначені для поверхневого гартування на глибину 2 -5 мм великих і малих валів, пальців, шийок колінчастих валів, розподільчих валів, шліцевих валів, гільз циліндрів, втулок та інших, для плавлення сталі, бронзи і латуні, а також для ковальського нагрівання і пайки. К.К.Д. установок з машинними генераторами сягає 65 %.

Лампові генератори виготовляють для частот від 70 000 до 5 000 000 Гц і вище, потужність від 1,5 до 300 кВт при к.к.д. до 45 %. Їх використовують для гартування на невелику глибину (до 2 мм) дрібних деталей (коромисел, поршневих пальців) та інструменту, різьбонарізного інструменту, фрез тощо.



Рисунок 3.2 - Установка для індукційного нагрівання з частотою струму в межах 30 - 80 кГц, потужність від 5 до 200 кВт для термічної обробки металів, паяння, відпалу тощо.

Випробування зразків поверхнево загартованих за розробленим режимом досліджені на машині тертя ЗНМ - 25 за схемою “куля-площина”, рух ковзання зворотно – поступальний, амплітуда взаємного проковзування $A = 4$ мм; швидкість ковзання - 500 мм /хв., нормальне навантаження $Q = 10$ Н, контр тіло – куля, виготовлена із сталі ШХ15.

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

3.2. Розробка режиму та інструменту для індукційного гартування

Враховуючи, що коромисло є відповідальною деталлю клапанного механізму ГРМ і повинне мати високу твердість поверхні бойка в поєднанні з діаметр дорівнював в'язкою серцевиною, доцільно розробити технологічний процес поверхневого гартування з нагріванням струмом високої частоти бойка для коромисла, виготовленого із сталі 45 та відновленого під час ремонту проведенням механічної обробки для усунення слідів зношування.

Коромисло працює в умовах, коли воно повинно мати високу твердість поверхні бойка для забезпечення високої зносостійкості та достатню в'язкість серцевини, щоб протистояти дії силових навантажень.

Для зміцнення відновленого коромисла пропонується проведення гартування з нагрівом робочої поверхні бойка струмом високої частоти.

Для деталей, які піддають поверхневому зміцненню важливо забезпечити загальний рівень навантажень та їх характер, що зумовлює вимоги до властивостей серцевини виробу. Для такої деталі як коромисло, яке піддається дії ударних та циклічних навантажень необхідно забезпечити високі показники міцності, утомної міцності, пластичності, ударної в'язкості. Такий комплекс властивостей по всьому перерізу деталі може бути досягнутий при достатньому прогартуванні. Марку сталі вибираємо з урахуванням критичного діаметра сталі. Критичний діаметр залежить переважно від вмісту легуючих елементів, отже легованість сталі залежить від перерізу деталі. Так як коромисло переважно працює на знос, то наскрізна прогартуваність не потрібна, достатньо щоб критичний $D_{кр.} = 0,25 R_{дет.}$ Для деталі «коромисло» згідно умов роботи не вимагають високої міцності серцевини, отже для її виготовлення можна вибрати вуглецеву сталь 45.

					<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

3.2.1 Характеристика сталі 45

Сталь 45 задовольняє вимогам гарної оброблюваності різанням і тиском при мінімальній трудомісткості виготовлення деталі. В гарячекатаному стані твердість сталі не більше HB 241, після відпалу – HB 197. Призначення сталі – середньонавантажені відповідальні деталі.

Технологічні властивості сталі 45:

Температура початку кування 1250, кінця 800 °С

Твердість в гарячекатаному стані HB 241.

Температури критичних точок сталі 45: A_{c1} - 725°C, A_{c3} - 810°C.

Структурний клас – доевтектоїдна.

Клас по твердості і в'язкості - високої твердості.

Клас по хімічному складу – вуглецева сталь.

Клас за якістю - якісна конструкційна.

Сталь 45 не схильна до утворення флокенів та відпускнуї крихкості, задовольняє вимогам гарної оброблюваності різанням і тиском при мінімальній трудомісткості виготовлення деталі; схильна до корозії, має неглибоку прогартовуваність, чутлива до перегрівання, сприймає гартування у воді [1]. Сталь 45 використовується для виготовлення гарячекатаного і холоднокатаного сортового прокату і поковок, які є заготовками для машинобудівного виробництва. З сталі 45 виготовляють відповідальні вироби від яких вимагається підвищена міцність після термічної обробки (шпінделі, кулачки, шестірні, вали, консолі, штоки, балки, плунжери).

Згідно [6] сталь 45 містить 0,45 % вуглецю, є багатокомпонентним сплавом, в складі якого є не тільки залізо і вуглець але й постійні технологічні домішки: Mn, Si, S, P, O, H, N та інші, які впливають на її властивості. Хімічний склад сталі представлено в табл.3.1.

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1. Хімічний склад сталі 45

Марка	Хімічні елементи, %					
	C	Si	Mn	S	P	Cu
45	0,42 –	0,17 –	0,50 –	До 0,040	До 0,40	0,15 -0,25
	0,50	0,34	0,80			

3.2.2. Вплив хімічного складу сталі на її властивості

Вплив вуглецю. Структура сталі згідно діаграмі стану залізо –цементит після повільного охолодження складається з двох фаз – фериту і цементиту. Тверді і крихкі часточки цементиту підвищують опір руху дислокацій, таким чином підвищують опір деформації, зменшуючи пластичність і в'язкість. Кількість перліту в структурі - 56%. Співвідношення фериту і цементиту ілюструє (рис.3.3). Вуглець підвищує міцність, твердість сталі, але зменшує її в'язкість. (рис.3.4)

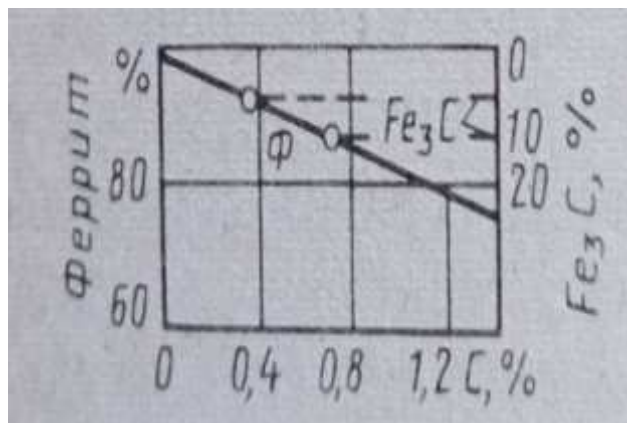
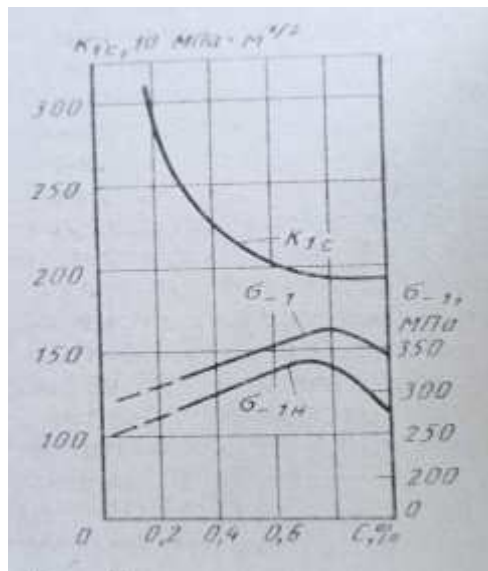


Рисунок 3.3 - Співвідношення між феритом і цементитом в сталях



Вміст вуглецю в сталі

Рисунок 3.4 - Вплив вуглецю на в'язкість руйнування і межу витривалості

Вплив кремнію та марганцю. Вміст кремнію у вуглецевих сталях не перевищує 0,37%, а марганцю – 0,8%. Кремній і марганець переходять в сталь в процесі її розкислення під час виплавляння. Вони розкислюють сталь з'єднуючись з киснем закису заліза FeO та у вигляді оксидів переходять в шлак. Кремній підвищує щільність злитків.

Кремній, що залишається після розкислення в твердому розчині (фериті), суттєво підвищує межу текучості сталі, що погіршує здатність сталі до витягання та холодного висаджування. Марганець підвищує міцність, значно знижує червоноламкість (крихкість при підвищених температурах), яка виникає під впливом сірки.

Вплив сірки. Сірка є шкідливою домішкою в сталі. З залізом вона утворює хімічну сполуку FeS , яка майже не розчиняється в залізі в твердому стані, а тільки в рідкому. Сполука FeS утворює з залізом легкоплавку евтектику з температурою плавлення 988°C . Евтектика кристалізується в останню чергу вже після кристалізації заліза, її кристали розміщуються по границям зерен.

Структура сталі 45 в рівноважному стані згідно діаграмі стану залізо – цементит складається з фериту і перліту. За структурою ця сталь доевтектоїдна (рис.3.7)

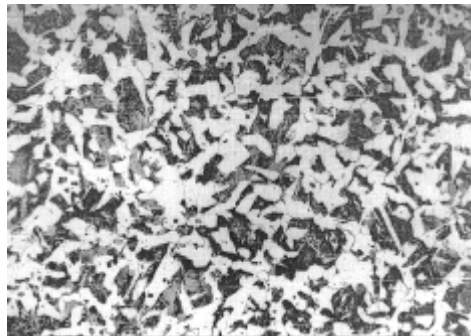


Рисунок 3.7 - Структура сталі 45 в рівноважному стані

3.2.3. Характеристика структурних складових сталі

Ферит є твердою фазою в системі залізо-цементит, являє собою твердий розчин вуглецю та інших домішок в α – залізі. Низькотемпературний α – ферит містить до 0,02% , при кімнатній температурі - 0,006%С. Ферит має такі механічні властивості:

$$\sigma_{\text{в}} = 250 \text{ МПа} \quad \sigma_{0,2} = 120 \text{ МПа}, \quad \delta = 50\%, \quad \psi = 80\%, \quad \text{НВ } 80 - 90$$

Перліт – ферито-цементитна суміш, яка утворюється при евтектоїдному перетворенні аустеніту, містить 0,83 % С. Перліт має пластинчасту будову, складається з межуючих пластинок фериту і цементиту. Твердість перліту залежить від розмірів кристалів цементиту, вона зростає при збільшенні дисперсності структури. Твердість перліту 1800 - 2200 МН/м² (180 - 220 кг/см²). В конструкційних сталях після відпалу має пластинчасту будову.

3.2.4. Механічні властивості сталі 45

Сталь 45 після гартування має твердість HRC 54-55. Велика критична швидкість охолодження не дозволяє отримати такі значення твердості у виробках діаметром більше 20 мм. Прогартуваність сталі невисока,

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

критичний діаметр в залежності від розмірів деталі не перевищує 12 мм (Дкр. = 12 мм). Механічні властивості сталі 45 (табл.3.2).

Таблиця 3.2. Механічні властивості сталі 45 (в стані постачання, прутки діаметром 15 мм)

Марка	Механічні властивості					
	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta\%$	$\psi\%$	НВ, МН	КСУ, Дж/см ²
45	700-850	490	14	40	197 -207	50

Сталь 45 має високу витривалість та зносостійкість після термічної обробки, тому вона широко використовується в машинобудуванні, верстатобудуванні та будівництві. Головна перевага сталі 45 – високі експлуатаційні властивості при невисокій вартості.

3.2.5. Режими термічної обробки виробів із сталі 45

3.2.6. Попередня термічна обробка

Коромисла із сталі 45 повинні мати однорідну та дрібнозернисту структуру. Сталі з такою структурою мають більш високі механічні характеристики. Нормалізація дозволяє одержати необхідний комплекс властивостей.

Нормалізація – вид термічної обробки, яка проводиться для усунення дефектів внутрішньої будови, одержання дрібнозернистої однорідної структури. Нормалізацію проводять для усунення грубозернистої структури, яка формується в сталі під час прокатування, кування, штампування. Сталь 45 для проведення нормалізації нагрівають до температури 850°C ($A_{c3} + 30 - 50$ °C) для одержання структури аустеніту, витримують декілька хвилин і

										Арк.
										59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2318103.000 ПЗ					

охладжують на повітрі. Час нагрівання розраховують згідно рекомендацій [11].

Технологія проведення нормалізації

Тривалість нагрівання визначається необхідністю забезпечення прогрівання виробу по перерізу й завершення фазових перетворень у матеріалі, але не повинна бути надто великою, щоб не спричинити появу термічних тріщин [14]. Тривалість нагрівання розраховуємо згідно рекомендацій: 1 хв. на 1 мм товщини деталі.



Рисунок 3.8 - Режим термічної обробки:

t_n – оптимальна температура нагрівання, τ_n – час нагрівання до заданої температури, τ_v – час витримки при цій температурі, $\tau_{\text{охол.}}$ – час охолодження,

$$\tau_{\text{заги}} = \tau_n + \tau_v + \tau_{\text{охол}}$$

Час нагрівання залежить від конструкцій нагріваючого пристрою та форми виробу. Приблизно його можна визначити за формулою:

$$\tau_n = 0,1 D_1 K_1 K_2 K_3, \quad (3.1)$$

де D_1 – мінімальний розмір максимального перерізу виробу (для пластини це її товщина);

K_1 – коефіцієнт середовища, (при нагріванні в середовищі повітря $K_1 = 2$, в розплаві солей $K_1 = 1$, в розплаві металу $K_1 = 0,5$);

K_2 – коефіцієнт форми (для кулі – 1, циліндра – 2, паралелепіпеда – 2.5, пластини - 4);

K_3 – коефіцієнт рівномірності нагрівання, (всебічне – 1, однобічне – 4).

										Арк.
										60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 2318103.000 ПЗ					

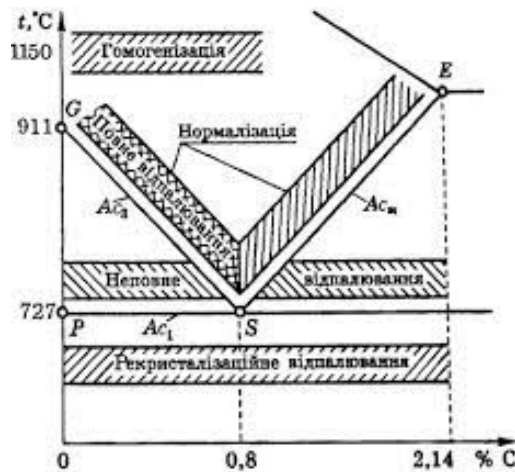
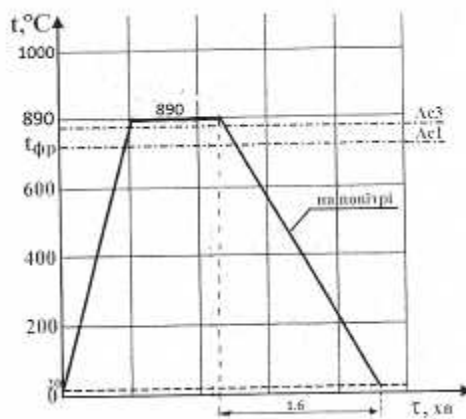


Рисунок 3.9 - Температурні інтервали відпалу та нормалізації сталі 45

Графік режиму проведення нормалізації сталі 45 представлений на рис.3.10



Час нагрівання

Рисунок 3.10 - Схема режиму нормалізації

Структура сталі 45 після нормалізації – сорбітоподібна (рис.3.11). Нормалізація для коромисла призначена як проміжна термічна обробка для поліпшення структури перед поверхневим гартуванням.

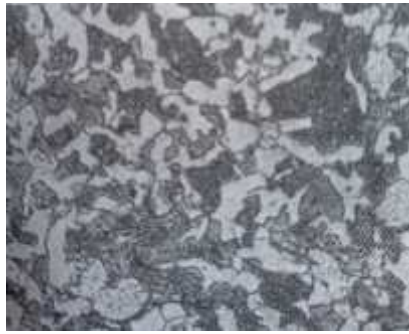


Рисунок 3.11 - Структура сталі 45 після нормалізації

Для проведення нормалізації вибираємо камерну піч СНО-3,5.5.3,5/12,5 [6].

3.3. Технологія індукційного гартування

3.3.1. Вибір типу індуктора і його розрахунок

Коромисло газорозподільного механізму виготовлене із сталі 45. Властивості серцевини і належна структура сформовані попередньою термічною обробкою. Це може бути нормалізація або гартування з високим відпуском. У процесі ремонту та відновлення зношених ділянок коромисла, його піддавали механічній обробці (шліфування для усунення слідів зношування).

Для надання поверхні бойка високої твердості та зносостійкості призначаємо після відновлення гартування з нагріванням струмом високої частоти. Це забезпечить поєднання твердості і міцності поверхневого шару з вязкою серцевиною. Після гартування в поверхневому шарі буде створена структура, яка здатна чинити опір зносу. В серцевині та суміжних ділянках не будуть відбуватись зміни структури та властивостей, сформованих попередньою термічною обробкою. Зміцнений поверхневим гартуванням шар позитивно має впливати на загальну міцність деталі, контактну витривалість.

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Знос коромисла відбувається внаслідок здійснення тертя кочення. Структура металу в поверхневому шарі має забезпечити опір зносу. Під час тертя кочення в зоні контакту діють нормальні зусилля, які сприяють виникненню в поверхневому шарі дотичних напружень. Ці напруження стають причиною появи мікротріщин - контактної втоми, сприяють відшаруванню та викрихчуванню невеликих об'ємів металу в поверхневих шарах. Переважно місцями виникнення зон руйнування є поверхня і ділянки, де діють найбільші дотичні напруження. Як правило, глибина цієї зони знаходиться в межах 1 мм. Тому поверхневий шар відповідає за зносостійкість і для підвищення контактної витривалості потрібно підвищувати міцність і твердість матеріалу деталі в межах цього шару.

Порівняно з хіміко-термічною обробкою (цементациєю, ціануванням) поверхнєве гартування не поступається за якістю сформованих властивостей поверхневих шарів.

Температура нагрівання коромисла для індукційного гартування (870 – 910 °С) вибрана згідно рекомендацій табл. 3.4

Таблиця 3.4. Температура нагрівання деяких марок сталей при поверхневому гартуванні, °С.

Марка сталі	Попередня термічна обробка	Температура при нагріванні у печі, °С	Температура, °С		
			10	3	1
35	Відпал нормалізація	840 – 860	880 – 900	900 – 940	940 – 980
			860 – 880	880 - 920	920 - 960
45	Відпал	810 - 830	850 - 870	870 - 910	910 - 950
50	Нормалізація поліпшення		830 -850	850 – 890	890- 930
		810 - 830	830 -870	870 -910	
35Г2	Нормалізація поліпшення	840 - 860	880 – 920	910 – 960	950 – 980
			860 - 990	780 - 940	920 - 980

надійні, володіють високим повним ККД і забезпечують мінімальне окислення заготовок внаслідок слабкого доступу повітря в зону нагрівання. Цей тип індуктора найбільш поширений на практиці. Щілинні індуктори мають більш низькі енергетичні показники і їх застосовують у тих випадках, коли зручність транспортування заготовок має особливе значення. Керуючись усім вищевикладеним, вибираємо індуктор нагрівальний періодичної дії.

Розрахунок проводимо для гартування деталі одночасним способом плоского тіла з розмірами 60x35 мм та товщиною 30 мм на глибину 3 мм при частоті 2500 Гц.

Для початку розрахунку приймемо ккд індуктора $\eta=80\%$ [1].

Напряга на 1 см довжини індукуючого провідника при питомій потужності 1 кВт/см² буде дорівнювати $U_0=0,75$ В/см, а струменева - 1 см ширини пазу в магнітопроводі при питомій потужності 1 кВт/см² буде рівною $I_0=3400$ А/см

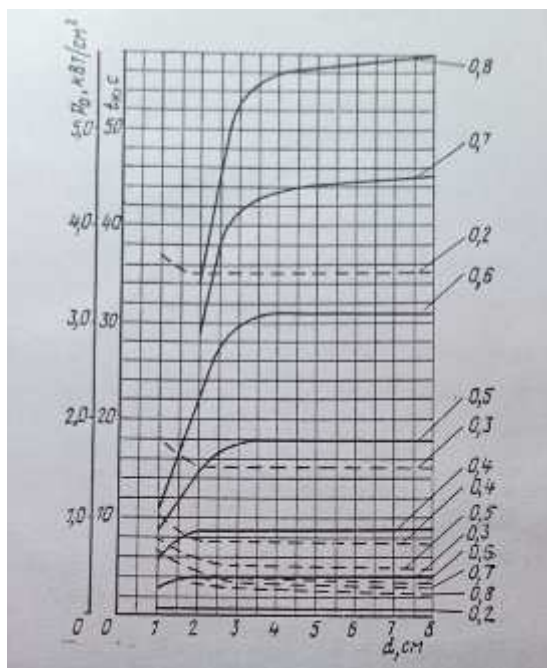


Рисунок 3.12 – Залежність тривалості нагрівання t_k (суцільні лінії) і питомої потужності p_0 (штрихові лінії) від товщини плоскої деталі d при частоті 2500 Гц.

Цифри на кривих показують глибину загартованого шару, см

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						68

7. Струм в індукторі

$$I_n \approx a \cdot I_o \cdot \sqrt{p_o}$$

$$I_n \approx 13,33 \cdot 3400 \cdot \sqrt{0,4} = 13,33 \cdot 3400 \cdot 0,63 = 28552,86 \text{ A}$$

8. Визначаємо реактивний опір шин, що підводять струм, з розмірами

$$l_{ш} = 6 \text{ см} \quad b_1 = 4 \text{ см} \quad b_2 = 18,5 \text{ см}$$

останній розмір визначається довжиною контактної колодки понижуючого трансформатора. При частоті $f = 2500$ Гц довжина колодки зазвичай дорівнює 18,5 см

$x_{ш}$ - реактивний опір шин для передачі струму, Ом

f - частота, Гц

$l_{ш}$ - довжина шин для передачі струму, см

Δ_1 - глибина проникнення струму в мідь, см

b^1 - еквівалентна ширина шини

$$b^1 = (18,5 + 4) / 2 = 11,25 \text{ см}$$

$$x_{ш} = 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot l_{ш} \cdot (2,5 \lg \frac{4 \cdot l_{ш}}{b^1 + \Delta_1} + 0,5)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$x_{ш} = 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2500 \cdot 6 \cdot (2,5 \frac{4 \cdot 6}{11,39 + 0,14} + 0,5) = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

9. Падіння напруги на шинах для передачі струму

$$U_{ш} = x_{ш} \cdot I_n$$

Запишемо цифрові значення, отримаємо:

$$U_{ш} = 0,21 \cdot 10^{-3} \cdot 28552,86 = 5,9961 = 6 \text{ В}$$

10. Напруга на індукторі

$$U_n = U + U_{ш}$$

$$U_n = 2,835 + 6 = 8,835 \text{ В}$$

11. Потужність, яка підводиться до індуктора

$$P_n = p_o \cdot l_n \cdot a / \eta_n = 0,4 \cdot 6 \cdot 13,33 / 0,8 = 39,99 \text{ кВт}$$

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

$$\cos\varphi = P_n \cdot 10^3 / U_n I_n = 39,99 \cdot 10^3 / 8,835 \cdot 28552,86 = 0,15$$

Загальний вигляд індуктора для гартування плоскої поверхні (рис.3.13).

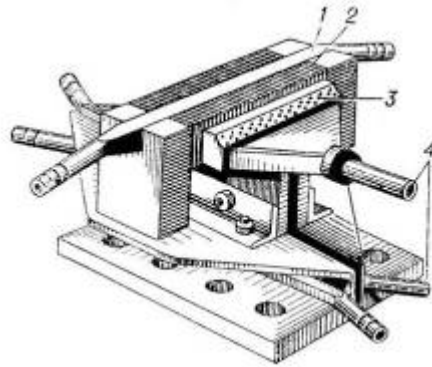


Рисунок 3.13 – Загальний вигляд індуктора для нагрівання плоских поверхонь при гартуванні струмом високої частоти:

1- індукторний дріт, 2- магнітопровід, 3 - пристрій для подачі охолоджуючої (гартівної) води; 4 - трубопровід водяного охолодження (для індуктора).

3.3.2. Структура та властивості сталі 45 після індукційного гартування

Аналіз структури сталі 45 загартованої з нагріванням струмом високої частоти (рис. 3.14). Сталь 45 після високочастотного гартування має неоднорідну будову по глибині загартованого шару: *a* - загартований шар – мартенсит; *б* - перехідний шар – мартенсит і ферит; *в* - вихідна структура – ферит і перліт.



a

б

в

Рисунок 3.14 - Мікроструктура загартованої сталі 45

(після індукційного нагрівання):

a - мартенсит на поверхні ; *б* – мартенсит і ферит в перехідній зоні;

в – вихідна ферито перлітна структура

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Мартенсит має дрібноголчасту будову, яка утворилась з дрібнозернистого аустеніту. Розмір зерна після індукційного гартування відповідає балу 10 – 11. Твердість поверхні HRC 60-62.

Загартована поверхня має підвищену зносостійкість. Випробування зразків поверхнево загартованих за розробленим режимом досліджені на машині тертя за схемою «куля-площина». Інтенсивність зношування у 1,2 рази менша, ніж зразків після цементації.

3.3.3. Дефекти, що виникають при гартуванні сталі з індукційним нагріванням.

При проведенні контролю якості загартованої з індукційним нагріванням деталі, можна виявити:

продавлювання загартованого шару деталі. Такий дефект виникає при недостатній глибині загартованого шару.

відколи крайок деталі, якщо крайки деталі були перегріті.

тріщини і мікротріщини на загартованій поверхні, що може бути викликане перегрівом, нерівномірною швидкістю охолодження, наявністю у деталі тонких перерізів, грубих рисок.

Нерівномірна глибина загартованого шару, що є причиною деформації деталі. Попереджають такий дефект проведенням відпуску для усунення залишкових напружень після механічної обробки та рівномірним охолодженням під час гартування.

Відшарування загартованого шару – є наслідком підвищених напружень в перехідних перерізах деталі.

Шелушіння – виявляється після проведеного шліфування з порушенням його режимів.

Глибина загартованого шару не відповідає нормі – причина – порушення технологічного та електричного режиму.

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Висновки

1. Після індукційного гартування коромисла із сталі 45 сформована тверда, зносостійка поверхня бойка з структурою дрібноголчатого мартенситу з високою твердістю HRC 59-60.
2. Індукційне гартування порівняно з пічним нагріванням дозволило одержати більш дисперсні структури гартування, які мають твердість на 2 – 3 HRC більшу, ніж після пічного нагрівання.
3. Після індукційного гартування деталі з вуглецевих сталей можна не піддавати відпуску, внаслідок того, що в поверхневому шарі встигають відбутись процеси часткового розпаду мартенситу.
4. При високочастотному нагріванні зменшується жолоблення виробів і не утворюється окалина, внаслідок чого не потрібно проводити очистку від окалини.

					<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>73</i>

11. Сігова В.І. Методи локальної поверхневої обробки деталей машин: Навчальний посібник. Сігова В.І., Руденко П.В. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 218 с.
12. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів. Підручник - Львів: Афіша, 2002, 304 с.
13. Матеріалознавство: підручник / С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плешаков. Х. : Вид-во ХНАДУ, 2007. 440 с.
14. Савуляк, В. І. С13 Матеріалознавство. Організація самостійної та практичної роботи : навчальний посібник / В. І. Савуляк, О. П. Шиліна, В. Й. Шенфельд. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 123 с
15. Говорун Т. П. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях): навч. посіб. / Т. П. Говорун, О. П. Гапонова, С. В. Марченко. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 163 с. ISBN 978-966-657-806-1 .
16. Металознавство і термічна обробка металів і сплавів із застосуванням комп'ютерних технологій навчання : підручник / [Таран Ю. М., Калінушкін Є. П., В. З. Куцова В.З. та ін.]; під ред. Ю. М. Тарана – Дніпропетровськ : Дніпрокнига, 2002. – 360 с.
17. Попович В.В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник / В. В. Попович, В. В. Попович. – Львів: Світ, 2006. – 624 с.
18. Шаблій О.М. Дослідження індукційного наплавлення тонких фасонних дисків з використанням магнітопроводу / О.М. Шаблій , Ч.В. Пулька // Вісник ТДТУ. – Том 7, №4. — 2002. — С. 77 — 80.
19. Патент №55349 Україна В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонкостінних фасонних дисків / Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Будзан Б.П., Скочило В.М (Україна); опубліковано 17.03.2003р., Бюл. №3.
20. Патент №55346 Україна В23К 13/00. Пристрій для наплавлення плоских тонкостінних деталей / Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Будзан Б.П. (Україна); опубліковано 17.03.2003р., Бюл. №3.

					<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

21. Стрельнікова В. А. «Підвищення ефективності електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту». Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії. Спеціальність 274 – Автомобільний транспорт. Галузь знань 27 – Транспорт. Харків - 2021. 206 с.
22. Батигін Ю.В., Сабокар О.С., Стрельнікова В.А. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагріву в сучасних технологіях машинобудування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017; 4 (133) : 70 – 4.
23. Rudnev V, Dossett J. ASM Handbook. Vol. 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. Induction surface hardening of steels. Ohio: ASM International; 2014, p. 438–61
24. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, Шиндерук СО, Чаплигін ЄО, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. 181 патентовласник. Пристрій індукційного нагріву з магнітним концентратором. Патент України №. 122800. 2018 Січ. 25.
25. Черненко В. С., Кіндрачук М. В., Дудка О. І. Променеві методи обробки: Навч. посібник. — К.: Кондор, 2004. — 166 с. — ISBN 966-7982-70-X
26. ДСТУ ISO 6506 – 1 : 2007. Металеві матеріали. Визначення твердості за Брінеллем.
27. ДСТУ ISO 6508 – 1 : 2013. Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом.
28. ДСТУ 7809 -2015. Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови.
29. ДСТУ 9074 – 2021. Сталь. Еталони мікроструктури.
30. ДСТУ 8972-2019. Сталі і сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна .
31. ДСТУ8967 – 2019. Сталь методи визначення знеуглецьованого шару.

					<i>МРТАМ 2318103.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

ДОДАТКИ

.....

					МРТАМ 2318103.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77