

**Міністерство освіти і науки України**  
**Луцький національний технічний університет**  
**Факультет митної справи, матеріалів та технологій**  
**Кафедра матеріалознавства**

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

**Вплив обробки шротом на структуру та властивості**  
**поверхневих шарів сталі 20ФЛ / The effect of shot blasting**  
**on the structure and properties of steel surface layers 20ФЛ**

спеціальності 132 "Матеріалознавство"

освітня програма "Індустріальний інжиніринг і менеджмент"

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПМ(ПМ)-41  
**Сохацький Тарас Ігорович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
к.т.н., доцент  
Гусачук Дмитро Анатолійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., доцент  
Гусачук Дмитро Анатолійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мельничук М.Д.

“ 11 ” 02 2025 року

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

*Сохацькому Тарасу Ігоровичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив обробки шротом на структуру та властивості  
поверхневих шарів сталі 20ФЛ*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*,

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

78/01-

затверджені наказом вищого навчального закладу від “07” 02 2025 року №02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи  
« 05 » червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *Зразки матеріалу (вилівки важеля, 20ФЛ), технологія  
литва, технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) *вступ; аналіз технічної літератури;*

*опис методики досліджень; вивчення впливу відпалу на структуру литої  
сталі 20ФЛ; дослідження впливу обробки шротом на структуру та  
властивості сталі 20ФЛ; висновки*

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

*1 слайд – Характеристика сталей для виливків деталей вагонів; 2 слайд –*

*Особливості обробки сталевих виливків на машинобудівних підприємствах;*

*3 слайд – Підготовка зразків для аналізу та випробувань; 4 слайд –*

*Структура виливків зі сталі 20ФЛ після литва; 5 слайд – Структура*

*вилівків зі сталі 20ФЛ після відпалу; 6-8 слайди – Вплив обробки шротом на*

*структуру та властивості сталі 20ФЛ; 9 слайд – основні висновки.*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормокон- троль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання «11» 02 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Аналіз літературних джерел.</i>	<i>06.05.2025</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>20.05.2025</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>03.06.2025</i>	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Сохацький Т.І. Вплив обробки шротом на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 20ФЛ (на матеріалах звіту з переддипломної практики та даних завдання до кваліфікаційної роботи). Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП "Індустріальний інжиніринг і менеджмент" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У розділах роботи висвітлено: аналіз використання конструкційних сталей для виливків машинобудівного призначення, процесів обробки виливків зі сталей, методичку досліджень, структуру та властивості сталі 20ФЛ, вплив обробки шротом на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 20ФЛ, практичні рекомендації щодо оптимізації термічної обробки виливків зі сталі 20ФЛ. Текстова частина містить 49 сторінок тексту, 17 рисунків, 4 таблиці, 21 літературних джерел та посилань, 1 додаток у вигляді презентації результатів досліджень. Презентація представлена на 8 слайдах.

В кваліфікаційній роботі досліджено процес обробки шротом виливків для потреб вагонобудування, на основі чого встановлено вплив на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 20ФЛ, розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення технологічних процесів очищення виливків, отриманих з низьковуглецевих сталей, зокрема сталі 20ФЛ.

Ключові слова: вилівок, сталь, литво сталі, технологія, термічна обробка, обробка шротом, структура, поверхневий шар, твердість, механічні властивості.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Сохацький			Вплив обробки шротом на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 20ФЛ / The effect of shot blasting on the structure and properties of steel surface layers 20ФЛ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Гусачук					3	49
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІМ)-41		
Н. Контр.		Мисковець						
Затверд.		Мельничук						

## ANNOTATION

Sokhatskyi T. The effect of shot blasting on the structure and properties of steel surface layers 20ФЛ (based on the materials of the report on bachelor's practice and the data of the assignment for qualifying work). Manuscript.

Qualifying work of a bachelor of the Educational Program "Industrial engineering and management" in the specialty 132 "Materials Science". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used and appendices. The chapters of the work cover: analysis of the use of structural steels for castings for machine-building purposes, processes for processing steel castings, research methodology, structure and properties of 20ФЛ steel, the effect of shot blasting on the structure and properties of surface layers of 20ФЛ steel, practical recommendations for optimizing heat treatment of 20ФЛ steel castings. The text part contains 49 pages of text, 17 figures, 4 tables, 21 literary sources and references, 1 appendix through presentation of research results. The presentation is presented on 8 slides.

The qualification work investigated the process of shot blasting of castings for the needs of railcar construction, based on which the effect on the structure and properties of the surface layers of 20ФЛ steel was established, practical recommendations were developed for improving the technological processes of cleaning castings obtained from low-carbon steels, in particular 20ФЛ steel.

Key words: casting, steel, steel casting, technology, heat treatment, shot blasting, structure, surface layer, hardness, mechanical properties.

					<i>БР 0625.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		4

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1.....	8
АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Характеристика деталей вагонобудування .....	8
1.2. Характеристика сталей для дрібних деталей вагонобудування.....	9
1.3. Особливості процесів термообробки сталевих виливкі .....	11
1.4. Структурні перетворення за відпалювання виливків .....	15
1.5. Застосування шротометної обробки для очищення виливків .....	17
1.6. Пропозиції щодо оптимізації технологічного процесу .....	20
РОЗДІЛ 2.....	21
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
2.1. Підготовка зразків для проведення макроаналізу .....	21
2.2. Підготовка зразків для проведення мікроаналізу .....	23
2.2. Травлення зразків сталі 20ФЛ .....	25
2.3. Термічна обробка зразків.....	26
2.4. Розробка способу обробки зразків сталі 20ФЛ шротом.....	29
2.5. Методи оцінки механічного стану зразків сталі 20ФЛ .....	30
РОЗДІЛ 3.....	32
ВПЛИВ ВІДПАЛЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ ЗІ СТАЛІ 20ФЛ.....	32
3.1. Структура сталі 20ФЛ після литва .....	32
3.2. Вплив відпалювання на структуру виливків.....	34
3.3. Твердість виливків після литва та термічної обробки.....	36
РОЗДІЛ 4.....	39
ВПЛИВ ОБРОБКИ ШРОТОМ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 20ФЛ .....	39
4.1. Вплив обробки шротом на стан поверхні зразків.....	39
4.2. Структура сталі 20ФЛ після обробки шротом.....	40

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

4.3. Властивості сталі 20ФЛ після обробки шротом .....	42
ВИСНОВКИ .....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	47
ДОДАТКИ	

					<i>БР 0625.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

## ВСТУП

Конструкційна низьколегована сталь для виливків 20ФЛ використовується у вантажному вагонобудуванні для виготовлення великогабаритних деталей, зокрема це: тягові хомути, надресорні балки, корпуси та деталі автозчеплення, бічна рама візка, деталі вагонних візків.

Більшість цих деталей отримують із литих заготовок, як найбільш раціонального виду напівфабрикатів для деталей вагонобудування. Одним з таких виливків є виливок распорки триангеля двохвісного візка вантажного вагону. Распорка входить до складу триангельного механізму гальмування, який розміщений з передньої та задньої сторони візка. При включенні механізму гальмування за допомогою триангельних балок зусилля гальмування прикладається до гальмівних чавунних колодок, при цьому значних навантажень зазнає опорна деталь триангельних балок – распорка триангеля. Крім того, за умов постійного контакту з брудом та пилом распорка зазнає абразивного спрацювання.

Яквідомо структура литих сталевих заготовок не є однорідною, та загалом у металі наявні залишкові напруження, які слід зняти перед обробкою та експлуатацією. Для забезпечення потрібних експлуатаційних властивостей виливкі распорки, які характеризуються наявністю залишкових напружень та неоднорідністю структури піддають дифузійному відпалюванню. Таку термообробку врівноважує структура та зменшує твердість, що покращує технологічність матеріалу виливків.

Для покращення стійкості та довговічності виливків після проведення дифузійного відпалювання у роботі запропоновано використати обробку шротом. Як відомо така обробка разом з очищенням поверхні металу від окалини та забруднень, сприяє поверхневому зміцненню завдяки явищу нагартування металу.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Характеристика деталей вагонобудування

Багато деталей вагонобудування виготовляються із сталевих виливків. Важливим елементом вантажних вагонів є вагонні візки, деталі яких виготовляють із виливків, використовуючи недорогі конструкційні низьковуглецеві сталі [1].

Візок моделі 11-260 є основним типом двовісного візка, який підходить під всі види вантажних вагонів [2]. Його основними частинами є: колісних пар з буксовими вузлами; двох литих бокових рам; ресорного підвішування; ковзунів; надресорної балки з опорами під кузов; фрикційних планок; підп'ятника для опори рами вагона на візок; гальмової передачі з триангельним приводом колодок.



Рисунок 1.1 – Дрібні виливки вагонобудування

Одною з основних складових візка вантажного вагону 11-260 є механізм гальмування, в який входять триангель, распорки триангеля, тяга та гальмівні колодки. Тяги передають зусилля від пневматичної системи вагону до триангелів та, відповідно, до гальмівних колодок. Під час гальмування, особливо під час екстреного гальмування, на система гальмування зазнає

значних статичних та динамічних зусиль. При цьому значного навантаження зазнають розпорки триангеля. Основними небезпечними навантаженнями є стискаюче та згинальне. При одночасній дії динамічного навантаження в розпорці триангеля виникають значні напруження, які приводять до появи тріщин та руйнування розпорки [3, 4]. Відповідно для еталей вагонних візків вибирають сталі високої в'язкості, що є стійкими до тріщиноустійкості з великою енергією руху тріщини в середині матеріалу, а також технологічними з гарною зварюваністю. Зокрема, на Крюковському вагонобудівному заводі для виготовлення розпорки триангеля рекомендують низьковуглецеві ливарні сталі: 15Л, 18Л, 20Л, 20ФЛ, 35Л [5].

## 1.2. Характеристика сталей для дрібних деталей вагонобудування

Для виготовлення виливків використовують вуглецеві й леговані сталі. Ливарні сталі позначають аналогічно конструкційним. У марках вуглецевих ливарних сталей 15Л, 20Л, 60Л, легованих 20ФЛ, 30ХГСЛ, 15Х18Н9ТЛ, 110М13Л та інших, буква Л вказує на приналежність до ливарних сталей [6].

Вуглецеві ливарні сталі мають високий тимчасовий опір (400...600 МПа), відносне видовження (10...25 %), ударну в'язкість, достатню стійкість при ударних навантаженнях. Основний елемент, що визначає механічні властивості вуглецевих ливарних сталей є вуглець. Вищий його вміст викликає збільшення твердості та міцності.

Механічні властивості легованих ливарних сталей визначаються кількістю легуючих елементів. Легування значно підвищує механічні й експлуатаційні властивості (жароміцність, корозійну стійкість, зносостійкість). Наприклад, марганець підвищує зносостійкість, хром – жаростійкість, нікель – корозійну стійкість тощо.

Ливарні сталі [6, 7] мають високу рідкотекучість, малу усадку (до 2,5 %), не схильні до утворення тріщин. Це обумовлено підвищеним вмістом таких елементів як сіліцій та марганець (таблиця 1.1). Сіліцію в ливарних сталях

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

може міститись від 0,3 до 0,6 %, що надає сталі більшої рідкотекучості, зменшує усадку. Марганцю міститься 0,4...0,8 %, такий вміст зеншує схильність сталі до утворення тріщин. Оскільки марганець здатний підвищувати ударну в'язкість вуглецевих сталей його вміст іноді може сягати більше 1,0 %.

Таблиця 1.1 – Склад ливарних низьковуглецевих сталей [6]

Марка сталі	Хімічний склад, %							
	C	Si	Mn	V	Ni	Cr	S	P
15Л	0,12...0,20	0,2...0,5	0,30...0,9	–	0,30	0,3	0,045	0,05
20Л	0,17...0,25	0,2...0,5	0,35...0,9	–	0,30	0,3	0,045	0,05
25Л	0,22...0,30	0,2...0,5	0,35...0,9	–	0,30	0,3	0,045	0,05
15ГНЛ	0,12...0,20	0,2...0,4	0,8...1,4	–	0,8...1,2	0,2	0,035	0,05
20ФЛ	0,14...0,25	0,2...0,5	0,7...1,2	0,6...0,12	0,30	0,2	0,045	0,05
25ГСЛ	0,22...0,28	0,6...0,8	1,0...1,3	–	0,30	0,2	0,035	0,04

Для отримання високих механічних і експлуатаційних характеристик цих сталей (таблиця 1.2) сталеві виливки піддають відпалу, нормалізації й іншим видам термічної обробки [8]. Застосовується також способи поверхневого зміцнення для відповідальних деталей.

Спеціальні способи термічної обробки для ливарних сталей вагобудування не застосовують. Гартування сталей не сприяє підвищенню твердості та є недоцільним в процесі виготовлення деталей.

Таблиця 1.2 – Властивості ливарних низьковуглецевих сталей [6]

Марка сталі	Механічні властивості				
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>
15Л	196	392	25	35	491
20Л	216	415	22	35	490
25Л	235	440	20	30	400
15ГНЛ	350	450	18	35	600
20ФЛ	294	491	18	35	491
25ГСЛ	245	470	18	30	300

Під час отримання ливарних сталей як шихтові матеріали застосовують сталевий лом, відходи власного виробництва, переробний чавун, руду, флюси й інші матеріали. Сталеві виливки переважно виготовляють у піщаних і оболонкових формах, литтям по виплавлюваних моделях, відцентровим литтям, литтям в облицьовані кокілі й інші способи [8, 9].

Для попередження усадочних раковин і пористості у виливках на масивні частини встановлюють прибуток, а в теплових вузлах виливків використовують зовнішні або внутрішні холодильники.

Щоб уникнути тріщин форми виготовляють із піддатливих формувальних сумішей, у виливках передбачають технологічні ребра.

Висока температура заливання (1550...1650 °С) вимагає застосування формувальних і стрижневих сумішей з високої вогнетривкості.

Ливникові системи для дрібних і середніх виливків виконують по розніманню або зверху, а для масивних - знизу сифоном. У зв'язку з невисокою рідкотекучістю сталей в порівнянні з чавунами площа перетину живильників ливникової системи має бути в 1,5...2 рази більше, ніж при литті сірого чавуну.

Сталеві виливки з вуглецевих сталей використовують у металургії, у верстатобудуванні, автотракторній промисловості, транспортному машинобудуванні й інших галузях. З них виготовляють станини й валки прокатних станів, циліндри, зубчасті колеса тощо. Леговані сталі використовують в енергомашинобудуванні, хімічної й нафтогазовій промисловості, металургії тощо. З них виготовляють турбінні лопатки, клапани гідропресів, арматури для хімічної й нафтогазової промисловості, зуби ковшів екскаваторів і інші виливки [9].

### 1.3. Особливості процесів термообробки сталевих виливкі

Для ливарних сталей після отримання фасонних виливків застосовують різноманітні види термічної обробки [8, 10]. Найчастіше застосовують відпал.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Відпал виливків дозволяє усунути ліквіацію, зменшити внутрішні напруження, підвищити однорідність структури, отримати рівноважну структуру сталі.

Дифузійний відпал, або гомогенізація, являє собою такий процес термообробки, метою якого є усунення або зменшення ліквіаційних розбіжностей у складі матеріалу виробу або гетерогенності мікроструктури. Розрізняють наступні види гетерогенності мікроструктури: зональну; анізотропну; ізотропну. У всіх випадках гетерогенність може ставитися до форми, розташуванню або розмірам структурних складових або часток різних фаз [11].

Зональна гетерогенність поширюється на більші області, причому форма зон (наприклад, області з підвищеною часткою фаз, що виділилися, області зі структурою загартування, області, збагачені домішками) залежить від зовнішньої форми литої заготовки.

Утворення анізотропної гетерогенності пов'язане з наявністю в матеріалі переважаючих напрямків, подібно тим, які виникають, наприклад, при пластичній деформації (зони плину) або транскристалізації. До групи анізотропної гетерогенності треба, наприклад, віднести вторинну стрічкову структуру у феррито-перлітних сталях і стрічкові скупчення карбідів у сталях з підвищеним змістом вуглецю (карбідна стрічковість).

Ізотропна гетерогенність не пов'язана з якими-небудь переважними напрямками в матеріалі. Типовим для цього виду гетерогенності є нерівномірне розташування структурних складових у скупченнях, які, однак, рівномірно розподілені по всьому об'ємі [12]. Ліквіація в мікрооб'ємах (дендритна або кристалічна) приводить до анізотропної і ізотропної гетерогенностям. Причиною є те, що в практичних умовах, тобто при нерівноважному затвердінні розплаву, завжди виникає розбіжність в складі окремих мікроділянок об'єму, оскільки стан рівноваги при переході "рідина-тверда фаза" не досягається. Внаслідок цього завжди мають місце розбіжності по хімічному складу між дендритами, та міждендритним простором. При цьому розташування ліквіаційних областей у структурі залежить від морфології

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

дендритів. На схильність до ліквації в мікрооб'ємах у процесі затвердіння впливають вид і кількість легуючих і супутніх елементів.

Дифузійний відпал у цьому випадку викликає підвищення ударної в'язкості в поперечному й поздовжньому напрямках за рахунок вирівнювання лікваційних розбіжностей по концентрації. Дифузійний відпал завжди супроводжується небажаними побічними явищами (ростом зерен і при тривалому відпалі в печах зі звичайною атмосферою – значною втратою матеріалу за рахунок утворення окалини). Тому після дифузійного відпалу проводять нормалізацію. Утворення окалини можна уникнути при використанні печей із захисною атмосферою.

Оскільки дифузійний відпал пов'язаний з більшими витратами, були спроби в міру можливості уникати цієї операції. Беручи до уваги необхідність здешевлення обробки сталі, треба вже при розливанні, нагріванні, деформації тощо звертати увагу на те, щоб забезпечити малу ліквацію або досягти гарної гомогенізації, наприклад, при обробці тиском. Добру можливість для здійснення цих вимог дає раціональне нагрівання злитків або заготовок для гарячої деформації. У цьому випадку технологічно необхідний процес нагрівання проводиться як цілеспрямована термообробка, бо відношення поверхні до маси при відпалі заготовок менше, ніж при відпалі готових виробів, втрати від утворення окалини в першому випадку також менші.

Зі сказаного ясно, що дифузійний відпалі як самостійна операція термообробки застосовується в більшості випадків тільки для литих сталевих деталей, що випробовують більші навантаження, або для таких важко гомогенізуючих сталей, як високолеговані інструментальні.

Метою відпалу для зняття напруг є зменшення залишкових (внутрішніх) напружень у заготовках і виробах без істотної зміни їх властивостей. Напруження у виробі (заготовки) можуть виникнути в результаті нерівномірного охолодження або яких-небудь структурних перетворень, що особливо йдуть із більшою зміною об'єму. Накладання залишкових напружень на напруження, які виникають при прикладених навантаженнях, може привести

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

до таких більших сумарних напружень, які можуть викликати небажані зміни форми (жолоблення) або навіть руйнування. Тому необхідно по можливості негайно після виникнення залишкових напружень провести відпал для їх зняття (насамперед у тих випадках, коли є підвищена небезпека утворення тріщин).

Залишкові напруження в заготовці можуть бути зняті в тих випадках, коли вони викликають пластичну деформацію в мікрообластях. Це вимагає, однак, щоб межа текучості стали була нижча величини залишкових напружень. Чим нижче межа текучості в порівнянні з рівнем залишкових напружень, тим більше буде пластична деформація в мікрообластях і завдяки цьому повніше відбудеться зняття залишкових напружень. Міцність для більшості матеріалів зі збільшенням температури, природно, падає. При відпалі для зняття напружень завжди здійснюється суцільний прогрів до відповідної підвищеної температури. Тривалість відпала повинна становити від 1 до 2 хв на кожний міліметр товщини виробу. Однак мінімальна витримка після повного прогріву повинна бути не менш 20...30 хв.

Температура нагрівання для зняття залишкових напружень обмежується рівноважною температурою перетворення  $A_1$  [10, 12]. Як правило, відпал для зняття напружень проводиться в районі температур від 450 до 650 °С. Слід зазначити також, що для поліпшених сталей верхня температура відпала обмежується температурою вже проведеного відпуску. Для надійності максимальна температура відпала повинна бути на 20...30 °С нижче температури відпуску. Необхідно враховувати, що у випадках, коли передбачена низька температура кінцевого відпуску, після відпалу, що буде приводитися при ще більш низьких температурах, значна частка залишкових напружень залишається. Якщо ці напруження перевершують припустиму межу, доводиться використати сталь із більше високою прогартовуваністю, що дозволяє застосувати більше м'яке охолодження при загартуванні.

Під нормалізацією розуміють нагрівання сталі до температур, що відповідають повному  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворенню або у випадку заевтектоїдних

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

сталей нагрівання з повним  $\gamma$ -перетворенням і частковим розчиненням карбідів, а також наступним залежно від складу сталі й діаметра виробу правильно проведеним охолодженням (звичайно на повітрі) з метою одержання рівномірної структури з тонкопластинчастим перлітом. Кінцевою метою процесу нормалізації є, таким чином, одержання певного стану структури в результаті перетворення аустеніту в перлітній області.

#### 1.4. Структурні перетворення за відпалювання виливків

Результат відпалювання сталевих виливків рівною мірою залежить від правильно обраної температури нагрівання, оптимальної витримки й правильного охолодження. Для температури нагрівання (аустенізації) у стандартах установлені її нижні границі для кожної марки сталі. Температура аустенізації повинна по можливості тільки небагато перевищувати температуру перетворення  $A_c$  (як правило, на  $30 \dots 50^\circ \text{C}$ ). У випадку великого перевищення температури над  $A_{c3}$ , головним чином у випадку доєвтекдоїдних сталей, виникає грубозерниста структура аустеніту (рисунок 1.2), що при порівнянних умовах охолодження приводить після перетворення до одержання більше грубозернистої кінцевої структури.

Особлива необхідність у нормалізації сталевих фасонних лиття пов'язана з тим, що обумовлене технологією повільне охолодження при затвердінні сприяє утворенню дуже грубозернистої структури, що, як правило, ще містить видманштетовий феррит. Нагрівання в інтервалі температур від  $780$  до  $950^\circ \text{C}$  (залежно від сталі) дозволяє усунути подібні небажані структури в нелегованому й легованому сталевому литті зі змістом вуглецю від  $0,3$  до  $0,6\%$ . Незважаючи на те що в цьому випадку температури нагрівання лежать трохи вище оптимальної області для гарячедеформованих сталей, для сталевих лиття (у якому ріст зерен аустеніту вповільнений через ліквідаційні ефекти) досягаються гарні результати нормалізації [12].

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

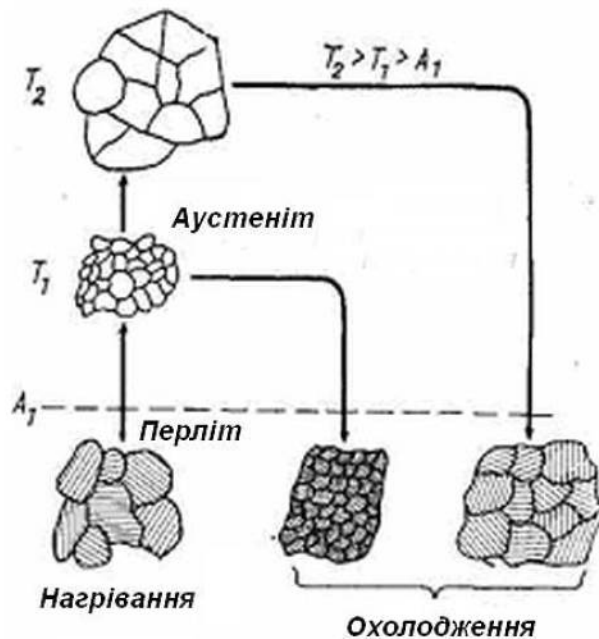


Рисунок 1.2 – Вплив температури аустенізації на розмір перліту після нормалізації

Тривалість витримки при температурі аустенізації визначається залежно від товщини матеріалу. У загальному випадку вважається достатнім 1 хв на кожний міліметр товщини стінки, причому зі збільшенням вмісту легуючих елементів час витримки варто трохи збільшити, з огляду на необхідність розчинення спеціальних карбідів. Як уже вказувалося, тривалість витримки, однак, не можна встановлювати незалежно від швидкості нагрівання й температури аустенізації [10].

Поряд з регламентуванням умов проведення нагрівання при нормалізації особлива увагу варто приділяти також режиму охолодження з температури нагрівання. Успіх нормалізації (одержання рівномірної тонкопластинчастої перлітної структури) значною мірою залежить від швидкості охолодження в області фазового перетворення. Дисперсність перлітної структури росте, якщо збільшується ступінь переохолодження аустеніту або підвищується швидкість охолодження. Звідси можна зробити висновок про те, що ступінь дисперсності структури після нормалізації тим вище, ніж швидше виробляється охолодження в області перлітного перетворення. Технологія охолодження повинна відповідати умовам протікання перетворення в даній сталі при певній товщині виробу. У

загальному випадку для невеликих поперечних перерізів досить проводити охолодження на спокійному повітрі.

### 1.5. Застосування шротометної обробки для очищення виливків

Очищення виливків після литва та процесів термічної обробки є обов'язковим процесом технології виготовлення деталей у загальному циклі виробництва машинобудівних підприємств. У наш час відомі декілька ефективних практичних методи очищення виливків від окалини та залишків формувальних сумішей [7-8]. Всі вони застосовані на механічній чи хімічній дії на поверхню виливка, у залежності від матеріалу виливка, його розмірів, програми випуску та можливостей самого підприємства.

Для сталевих виливків актуальним є використання обробки шротом, частинки якого інтенсивно діють з ударним ефектом на поверхню виливка та збивають окалину й інші забруднення [13-15]. Під час удару енергія частинки витрачається на руйнування шару окалини (рисунок 1.3) та збивання її залишків. Окремим ефектом шротометної обробки є механічний вплив на поверхневі шари сталевих виливків, які після проведення відпалювання здатні інтенсивно зміцнюватись. Цей ефект дозволяє значно покращити стан поверхні металу, забезпечивши поверхнєве зміцнення у вигляді пластичного нагартування, та формування стану поверхні, що є більш корозійно стійким до дії зовнішнього середовища, та отримує більшу стійкість проти абразивного стирання [15].

Шротометна обробка – це процес, у якому найчастіше використовується повітря під високим тиском з подачею дрібних металевих частинок та спрямування їх на поверхню заготовки. Цей процес може бути використаний для видалення іржі, фарби або інших покриттів з металевих поверхонь. Його також можна використовувати для підготовки металевих поверхонь до фарбування або інших видів оздоблення.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.3 – Схема дії шротини на поверхню виливка [16]

Шротоструминеве зміцнення здійснюють в холодному стані, тому він часто використовується для створення шару залишкових напружень стиску та зміни механічних властивостей компонента. Він передбачає удар дробом по поверхні, застосовуючи достатню силу для створення пластичної деформації.

Цей процес зазвичай використовується для металевих виливків, щоб підвищити втомну міцність та стійкість до корозійного розтріскування під напругою для таких деталей, як осі, пружини (гвинтові, крутильні та листові), шестерні, вали, шасі літаків, деталі конструкції та подібні вироби, але використання не обмежується цими сферами застосування. У багатьох дослідженнях [13-15] доведено, що ці процеси підвищують стійкість до корозійного розтріскування під напругою та покращують характеристики текучості.

Під заглибленнями, що виникають під дією удару шротини, утворюється стискаючий об'єм (рисунок 1.4). В обробленому металі створюється тонкий шар за рахунок перекриття заглиблень. Цей шар може бути стійким до корозії, виникнення та поширення тріщин. Під час процесу дробоструминного зміцнення навколо пластично деформованого шару утворюється пружно деформований шар. Пластично деформований шар має тенденцію до розширення, а сусідній пружно реагуючий матеріал запобігає цьому. В результаті цього поверхневий шар до певної глибини піддається постійним залишковим напруженням. Процес зміцнення під час шротоструменевої обробки має такі переваги: він відносно недорогий; у цьому процесі використовується довговічне технологічне обладнання; процес можна легко використовувати для великих площ поверхні.

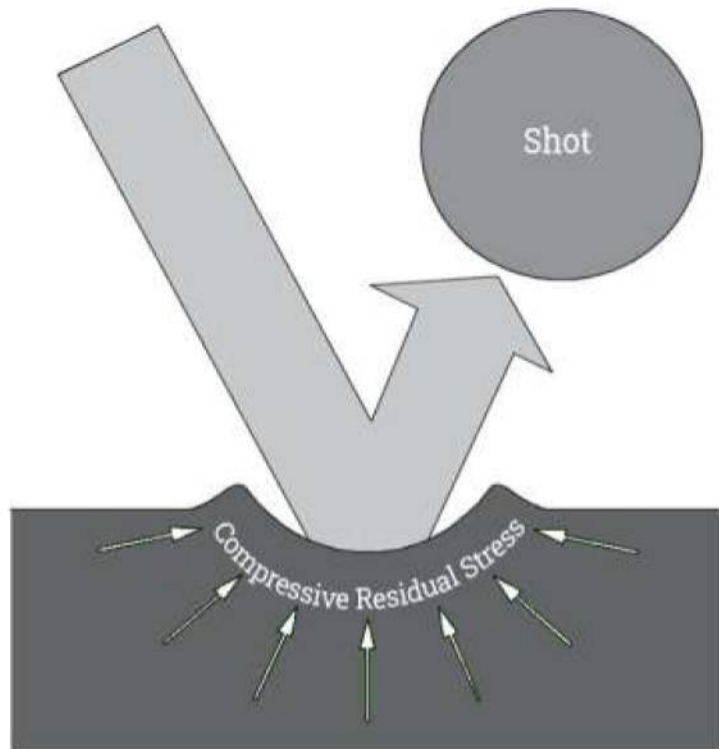


Рисунок 1.4 – Схема впливу шротини на метал [17]

Однак процес обробки виливків шротом має й деякі недоліки: він є напівкількісним, особливо при оцінці інтенсивності шротоструменевого зміцнення; залишкові стискальні напруження обмежені по глибині, зазвичай у м'яких сплавах, таких як алюмінієвий сплав, і не перевищують 0,25 мм (у твердих металах вони ще менше); процес є мало ефективним для обробки локальних ділянок та гострих заглиблень чи кутів; шротоструменева обробка зазвичай призводить до шорсткої поверхні на виливках та деталях, особливо у м'яких сплавах, таких як алюміній. Шорсткий шар зазвичай видаляється для промислового застосування, тому шар залишкових стискальних напружень також можна видалити [15, 18].

Фактична глибина залишкових напружень стискання, що виникають під час зміцнення за шротоструменевого оброблення, зазвичай знаходиться в діапазоні 0,5...1 мм або більше, залежно від властивостей матеріалу та умов обробки, що може бути в чотири рази глибше, ніж при дробоструминному зміцненні. Крім того, шротоструминне зміцнення може призвести до деформації тонких профілів, але поверхні, оброблені лазерним зміцненням, зазвичай не втрачають жодної розмірної точності. Залишкові напруження - це

«обмежені» напруження в компоненті. Залишкові напруження відіграють важливу роль у втомі інженерних матеріалів, оскільки зародження втомних тріщин відбувається через розтягувальні напруження, і вони зменшуються залишковими напруженнями.

#### 1.6. Пропозиції щодо оптимізації технологічного процесу

Аналізуючи основні типи та номенклатуру виливок з низьковуглецевих конструкційних ливарних сталей, практику їх використання у машинобудуванні, та зокрема для потреб вагонобудування, удосконалення технологічних процесів виготовлення та підготовки виливків є актуальним завданням виробничих процесів. Важливим етапом підготовки виливків є їх термічна обробка та очищення перед процесами механічної обробки.

Для очищення поверхні виливків часто застосовують обробку шротом, яка є ефективним процесом очищення від окалини. Застосування такої технології може також бути використане для оптимізації стану поверхні металу виливків, у вигляді її поверхневого зміцнення. Структурна проробка поверхні низьковуглецевої сталі може покращувати стійкість виливків в атмосферних умовах, та під дією абразивного пилю.

Метою роботи було дослідити вплив обробки шротом на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 20ФЛ, на основі чого розробити рекомендації щодо оптимізації технології обробки виливків для потреб вагонобудування.

Основним завданням роботи є розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації технологічного процесу термічної обробки та очищення фасонних виливків зі сталі 20ФЛ.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		20

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Підготовка зразків для проведення макроаналізу

Оскільки основним завданням роботи була оцінка впливу обробки виливків сталі 20ФЛ на їх структуру та властивості, у тому числі поверхневого шару після обробки шротом, в роботі переважно використовували структурні дослідження. Для детального аналізу структурного стану та якості виливків для потреб вагонобудування застосовували методику макроструктурного та мікроструктурного аналізу.

Макроструктурний аналіз полягає в дослідженні металу при огляді його поверхні неозброєним оком або за допомогою невеликого збільшення (до 30 разів). Для цього застосовували спеціальним способом виготовлені макрошліфи.

Основна перевага макроаналізу в одночасному дослідженні великої поверхні, що дозволяє мати уявлення про загальну будову литого металу, про наявність в структурі окремих макродефектів, а також про характер розподілу домішок на перерізі деталі або зразка, що вивчаються.

На відміну від мікроаналізу за макроструктурним аналізом не можна визначити подробиці структури металу. Тому він часто не остаточний, а лише попередній вид дослідження. Характеризуючи багато особливостей будови металів, мікроаналіз дає змогу обрати ділянки, що потребують подальшого мікроскопічного дослідження.

Відомості про якість металевої деталі можна отримати, досліджуючи поверхню деталі після того, як з неї видалено бруд, оливу тощо. При цьому можна виявити тріщини від втомленості, дефекти зварних з'єднань (підрізи, непровар), поверхневі ливарні дефекти (поверхневі бульбашки, незаповнення форми, усадкові раковини, тріщини тощо), дефекти загартованих деталей (гартівні тріщини, поводки).

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Приготування макрошліфів починали з вибору місця на деталі або зливку, яке є найважливішим та найхарактернішим. Як деталь взірець був вибраний важіль розпорки вагонного візка, відлитий зі сталі 20ФЛ. Важіль являє собою видовжену, переважно призматичну деталь, з розширенням у центральній частині та отвором (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Важіль розпорки колісного візка вантажного вагону. Зріз для макроаналізу (праворуч)

У важеля розпорки найнебезпечнішим місцем з незначною площею поперечного перерізу є ліве плече. З обраного місця вирізали темплет - пластину певної товщини. Спосіб різання металу обирається такий, щоб досліджувана поверхня не нагрілася до температур, що перевищують поліморфні перетворення металу, а інколи й до нижчих температур, наприклад, при дослідженні ширини зони поверхневого гартування. Після вирізання темплета досліджувана поверхня вирівнюється наждачним кругом. Після обробки наждачним каменем, поверхня макрошліфа шліфується наждачним папером з абразивним зерном великих та середніх номерів. Зразки шліфують шліфувальною шкуркою вручну або на шліфувальних верстатах. Найширше застосовуються абразивні синтетичні матеріали: електрокорунд (основа  $Al_2O_3$ ) і карбід кремнію. Зернистість шліфувальної шкурки встановлена залежно від розміру абразивних часток. Так, якщо зернистість шліфувальної шкурки № 16, 8, 5, то розміри абразивних часток відповідають 160, 80, 50 мкм.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Шліфування виконують на шліфувальних шкурках різних номерів, поступово зменшуючи зернистість. Шліфування кожною шкуркою потрібно проводити так, щоб усі риси на поверхні зразка були паралельними. При переході до наступного номера напрям шліфування змінюють на  $45 \dots 90^\circ$  за умови відсутності слідів попередньої обробки. Якщо деталь має великі розміри, наприклад зливки сталі, поверхню темплета шліфується на плоскошліфувальних верстатах.

Після шліфування поверхню макрошліфа очищаємо від абразивного пилу та обезжирюємо розчинниками (найкраще спиртом). Оброблену в такий спосіб поверхню вже можна досліджувати для виявлення тріщин, газових порів та усадкових раковин.

Для виявлення ліквіційних зон, дендритної структури, дифузійних зон тощо необхідно поверхню макрошліфа протравити спеціальними травильними розчинами, причому для різних завдань слід застосовувати різні розчини. Найчастіше застосовують хімічне травлення, яке виконують зануренням макрошліфа в реактив протягом  $1 \dots 3$  хв.

## 2.2. Підготовка зразків для проведення мікроаналізу

Мікроскопічний метод дослідження, або мікроструктурний аналіз, дає змогу вивчати структуру металів і сплавів за допомогою мікроскопа на спеціально підготовлених зразках, які називаються мікрошліфами. Структура металів і сплавів, яка визначається при мікроаналізі, називається мікроструктурою. Мікрошліф спочатку готували так само, як і макрошліф (вирізання, шліфування зразків), але потім застосовували обов'язкове полірування поверхні перед травленням.

Для якісного приготування зразків для мікроаналізу доцільно оптимізувати їх розмір, бажано мати невелику площу аналізу та компактні розміри для зручного утримування під час шліфування. Зразки для мікроаналізу спеціально вирізали з важиля в характерних злінах. Окрема

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

готували зразки, які б дозволяли вивчити структуру поверхового шару вилівка після шротоструменевої обробки.

Мікрошліф, мав розміри 12×12 мм (рис. 2.2). Висота зразка 10...15 мм. Зразки найчастіше готуються при шліфуванні на спеціальних верстатах із закріпленням шліфувального паперу на обертальних дисках. Шліфувальний папір застосовують такий самий, як і при виготовленні макрошліфа, але набір паперу різної зернистості значно більший.

Поліруванням виправляють дрібні дефекти поверхні, вибираються риси, які залишаються після шліфування. В дослідженнях мікроструктури розпорки триангеля застосовували механічне полірування.



Рисунок 2.2 – Вигляд зразків для досліджень мікроструктури

Мікрошліфи початкових, загартованих та нітроцементованих зразків готувалися з попереднім заливанням їх епоксидною смолою. Це дозволяло уникнути значних завалів на краю поверхні мікрошліфа в зоні утворення нітроцементованого шару. Таким чином, при фотографуванні структури шару вдавалось уникнути значного розфокусування по видимій зоні мікрошліфа, під час проведення металографічного аналізу. Це також дозволяло здійснювати більш якісну фіксацію зображень структури, використовуючи цифрову камеру.

Механічне полірування виконували на крузі, що обертається, з натягнутим на нього полірувальним матеріалом (фетр, оксамит, тонке сукно), на який періодично наносять абразивну речовину з частинками малих розмірів – 5...1 мкм (оксид хрому, оксид алюмінію тощо). Полірування

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

вважається закінченим, якщо поверхня зразка набуває дзеркального блиску і під мікроскопом не видно рисок та подряпин.

## 2.2. Травлення зразків сталі 20ФЛ

Після дослідження мікрошліфа під мікроскопом виконували останню операцію виготовлення мікрошліфів для вивчення мікроструктури – травлення. Травлення дозволяє визначити число, розміри, форму, взаємне розміщення і кількісне взаємовідношення фаз і структурних складових. Принцип травлення багатофазних сплавів полягає у вибіркового розчиненні різних фаз в травильному реактиві внаслідок різних швидкостей розчинення.

Наприклад, для виявлення мікроструктури низьковуглецевих сталей застосовували 3...5 % розчин азотної кислоти в етиловому спирті. Після травлення зразок промивали під струменем води, а потім у спирті та просушували фільтрувальним папером.

Для мікроскопічного дослідження структури металів використовували металографічні мікроскопи ЕС МЕТАМ РВ-3 та МИМ-10М. Вони відрізняються від біологічних головним чином методом освітлення зразка. Це пояснюється тим, що металічні шліфи непрозорі для світлових променів, тому їх досліджують не в прохідному, а у відбитому світлі.

Як показали дослідження мікроструктура вилівка важеля вагонного візка характеризується ферито-перлітною будовою. Причому кількість перліту в структурі вилівка, за результатами кількісного аналізу при збільшенні  $\times 100$ , складає близько 50 %. Присутність значної кількості евтектоїду пояснюється прискореним охолодженням вилівка від температур повного затвердіння. Такий нерівноважний стан сталі 20ФЛ характеризується також неоднорідністю розподілу фериту з наявністю зон типової відманштетової структури. Це викликає неоднорідність механічних властивостей та підвищеної крихкості.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

### 2.3. Термічна обробка зразків

Сталеві виливки безпосередньо після кристалізації та охолодження характеризуються неоднорідною грубозернистою структурою, ліквациєю, підвищеною твердістю, великим ривнем внутрішніх напружень. Ці особливості посилюються при збільшенні розмірів та маси виливків, що призводить до низьких показників пластичності та міцності. Для їхнього покращення відлиті вироби зі сталі піддаються термічній обробці. З урахуванням природи сплаву та вимог до якості виливків підбираються відповідні операції та режими термічної обробки. Виконуються дані процеси термообробки відповідно до стандартних режимів та технічних вимог, на що орієнтувались під час розробки процесу відпалювання виливків.

Термообробка литого металу характеризується деякими особливостями порівняно з термообробкою кованого чи прокатаного. У виливках внаслідок специфічних умов їх затвердіння спостерігається велике зерно, що зумовлює зазвичай низькі механічні властивості. Литая сталь до термообробки має грубу структуру видманштетта. Грубозерниста структура та внутрішні напруження знижують механічні властивості металу і призводять до деформації виливків. Для поліпшення структури та механічних властивостей застосовують відпал або нормалізацію, яка є підготовчою, а часто і остаточною термообробкою, що завершує технологічний цикл отримання виливків за моделями, що виплавляються.

Основна вимога до структури литих низьковуглецевих сталей, що працюють в умовах як статично, так і динамічного навантаження – однорідність структури в об'ємі виробу. Сталь з такою структурою здатна витримувати значні ударно-статичних навантаженнях, які спостерігаються в умовах екстреного гальмування потягу. Крім того низько вуглецеві сталі з однорідною структурою та врівноваженим хімічним складом більш стійкі до атмосферної корозії, в порівнянні зі сталями з більшим вмістом вуглецю.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Однорідна структура низьковуглецевих сталей забезпечує високі показники в'язкості, що надає деталям міцності та здатності витримувати значні статичні навантаження. При наявності включень інших фаз в структурі сталей (неметалічні включення, карбіди) міцність сталі помітно знижується, за рахунок підвищення крихкості.

При отриманні виливків з низьковуглецевої сталі 20ФЛ не вдається отримати, при кристалізації, однорідної врівноваженої структури. Навіть у виливках незначної товщини спостерігається поява дендритної ліквідації. Причому, таке явище найбільше виражене в потовщених місцях виливка опори триангеля, що значно погіршує міцність сталі. В структурі великогабаритних виливків можна спостерігати грубу зернисту структуру серцевини з можливою появою мікропорожнин та тріщин.

Таким чином, єдиним способом уникнення хімічної та структурної неоднорідності виливків з низько вуглецевих конструкційних сталей є їх термічна обробка. Термообробка полягає в проведенні нормалізаційного відпалу сталі при температурах вищих на 30...50 °С від температури  $A_{c3}$ . В цьому випадку розвинуті процеси дифузії та рухливості атомів дозволяють врівноважити структурний стан виливків та отримати однорідну структуру з високою в'язкістю. Наступне охолодження на повітрі гарантуватиме отримання нормального зерна доєвтектоїдної низьковуглецевої сталі. Можливі варіанти технології відпалу низьковуглецевих сталей та її вплив на остаточну структуру були розглянуті в другому розділі пояснюючої записки.

Враховуючи розглянутий матеріал щодо ефективних процесів відпалу сталей, для виливків распорки триангеля візка вантажних вагонів, пропонується застосувати нормалізаційний відпал з нагрівом до температур 920...950 °С. При цьому нагрівання до температур відпалу провести зі швидкістю не більше 100 °С/год (рисунки 2.3). Витримку при 920...950 °С прийняти 6 годин. Охолодження нагрітих виливків провести ступінчасто. Спочатку виливкі охолоджувати разом з піччю до температур 680...700 °С.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Наступне охолодження провести на спокійному повітрі. Це забезпечить більш однорідну нормалізовану структуру виливків.

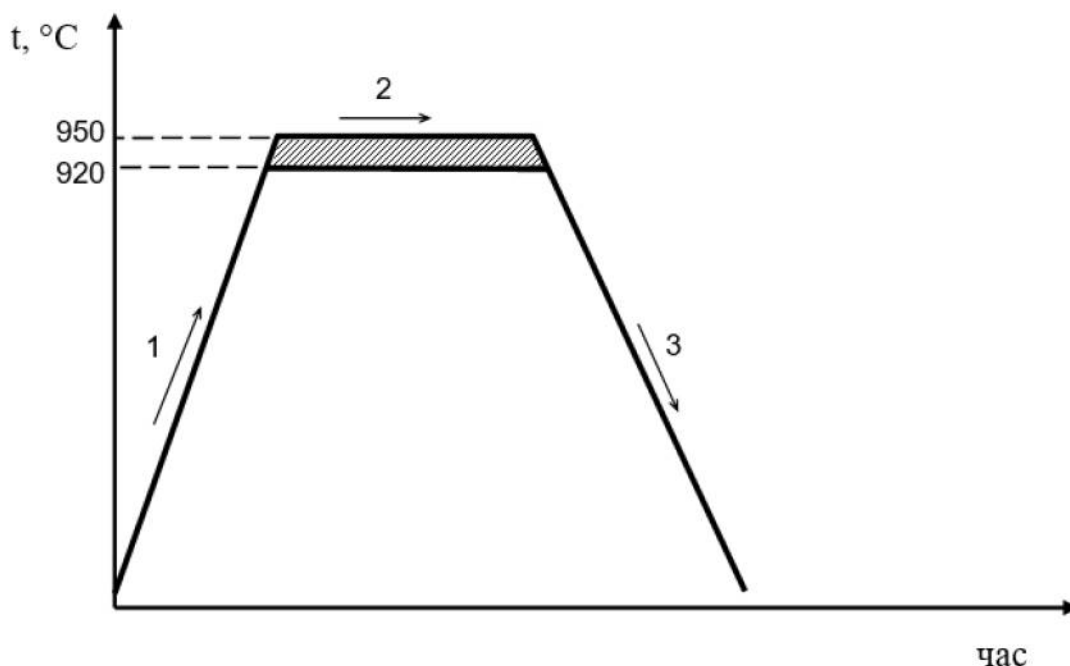


Рисунок 2.3 – Температурно-часовий режим відпалу для зразків литої сталі 20ФЛ:

1 – нагрів (швидкість не більше  $300\text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ ); 2 – витримка (час витримки 1...1,5 годин); 3 – охолодження на повітрі.

Зменшення швидкості нагрівання зразків литої сталі відповідало вимогам щодо процесів відпалювання реальних виливків з низьковуглецевих сталей. З врахуванням матеріалу та конфігурації важеля візка доцільно обмежити швидкість нагрівання зразків не вище  $300\text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ .

Тривалість нагріву та витримки за температур відпалу визначається часом, необхідним для наскрізного прогріву всього виливка та для завершення структурних перетворень. При відпалі температура нагрівання трохи вище точки  $A_c$  і перетворення протікають повільно. Крім того, через грубу литу структуру також потрібно збільшення витримки. Тривалість витримки при відпалі більша, ніж при нормалізації. Неможливо назвати єдину тривалість нагрівання та витримки виливків під час термообробки, оскільки вона визначається термічним обладнанням, розміром виливків та їх вихідною структурою. Можна назвати як орієнтовну практично поширену норму, за якої

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

тривалість нагріву та витримки при заданій температурі в сумі становить 0,5...1 год на кожні 15 мм товщини стінки виливки. Враховуючи, що товщина важіля становить 32 мм тривалість витримки прийнято до 1,5 години.

#### 2.4. Розробка способу обробки зразків сталі 20ФЛ шротом

Для підвищення поверхневої твердості важіля розпорки візка вантажного вагону в технологічному процесі пропонується застосувати поверхневе нагартування. Для цього найкращим варіантом для низьковуглецевої сталі 20ФЛ є деформаційне наклепування. Пропонується застосувати шротометну обробку, яка одночасно дозволить провести очищення відпалених виливків від окалини.

Як відомо, сьогодні існують машини в яких здійснюється два основних способи обробки виливків шротом. Руху потоку шротин здійснюється струменем стиснутого повітря або лопатями пристрою, що метає (ротора). Для здійснення процесу використовують обладнання різної конструкції – шротоструменеві та шротометні установки. Метод набув широкого поширення технології виготовлення деталей машин, інструментів, приладів завдяки його універсальності і досить високої продуктивності. Це один із найбільш традиційних методів обробки ППД. Як зміцнює цей метод застосовують для обробки переважно зовнішніх поверхонь різної кривизни та протяжності. Зазначається, що при цьому досягається товщина (глибина) наклепу до 0,5...0,7 мм, його ступінь становить 20...40%, а стискаючі залишкові напруги, що утворюються, досягають 900 МПа.

В роботі в якості експериментальної обробки шротом зразків застосовували установку, принцип роботи якої заснований на розгоні шротин струменем стиснутого повітря. Використовували шротометну шафу моделі СКМ-500, в якій використовується напорна система подачі шротин у активний пістолет робочої камери (рисунок 2.4).

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29



вигляд

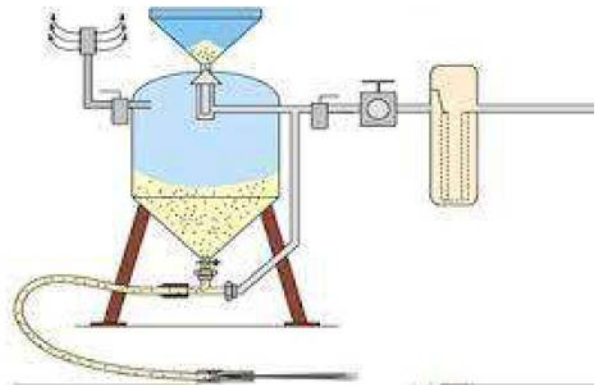


схема роботи

Рисунок 2.4 – Шафа шротоструменевої обробки дрібних виливків

Найбільш суттєвими параметрами процесу є швидкість потоку дроби, діаметр окремих частинок, кут атаки, відстань до оброблюваної поверхні та тривалість впливу на ділянку поверхні. Крім того, інтенсивність обробки металевим шротом залежить від часу обробки. Підготовлені зразки, що були вирізані з відливка важіля, оброблялись струменем шроту в установці з різним часом обробки: 5, 10 та 20 хвилин. Діаметр шротин становив 3...5 мм.

Шротоструминне очищення виливків дозволяє отримувати високу чистоту поверхні, проте область застосування цього способу обмежена головним чином очищенням внутрішніх глибоких і складних порожнин. Це обмеження викликане високою енергоємністю способу та запиленістю робочого місця. Крім того, при шротоструминному очищенні має місце злипання і корозія шротин, що викликаються наявністю вологи в стислому повітрі.

## 2.5. Методи оцінки механічного стану зразків сталі 20ФЛ

Для оцінки стану обробленої поверхні зразків сталі 20ФЛ у роботі використовували методи вимірювання твердості та мікротвердості.

Вимірювання твердості, як метод оцінки механічного стану матеріалу є достатньо інформативний. Способи вимірювання твердості мають переваги в порівнянні з іншими механічними випробуваннями матеріалів. Основним є

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

простота виконання вимірювань, їх швидкість, простота форми зразків та невеликі їх розміри, а також універсальність методики.

Загальну твердість зразків сталі 20ФЛ у литому стані та після обробки визначали на універсальному твердомірі NOVOTEST TC-БРВ. Прилад дає можливість зміни таких параметрів вимірювання: сили навантаження, часу вимірювання, тоб то дії на поверхню матеріала індентора твердоміри. Для виконання вимірювань зразок слід розташувати на робочому столі твердоміра, далі за допомогою гвинта столика підвести поверхню зразка до дотику з індентором. Далі вмикаємо навантаження і пристрій втискає індентор у поверхню зразка. Після зняття навантажень індикатор приладу показує значення твердості на шкалі.

Оцінку твердості поверхневих шарів експериментальних зразків після обробки дробом проводили шляхом вимірювання мікротвердості за способом Віккерса чи мікроВіккерса. Для цього використовували мікротвердомір моделі ПМТ-3 з ручним навантаженням індентора. Навантаження на індентор становило рівним 100 грам.

З метою отримання інформації про вплив технології зміцнення поверхні зразка за обробки дробом на межу витривалості, в роботі виконували випробування на знакозмінний вигин згідно ДСТУ EN 10218-1-2001 на стандартних циліндричних зразках; частота випробування для всіх варіантів становила 500 циклів на хвилину. Такі дослідження давали можливість оцінити вплив зміцнення поверхні відпаленої литої сталі 20ФЛ після обробки сталевим шротом.

					<i>БР 0625.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		31

РОЗДІЛ 3  
ВПЛИВ ВІДПАЛЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА  
ВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ ЗІ СТАЛІ 20ФЛ

3.1. Структура сталі 20ФЛ після литва

Структурний стан сталевого литва є важливим виливків різного машинобудівного призначення. Фасонні виливки у вагонобудуванні часто зазнають динамічних навантажень, тому контроль та оптимізація їх структури, з досягненням рівноважного однорідного стану є важливим завданням ливарного виробництва.

Під час кристалізації сталі, завдяки вибіркового характеру кристалізації компонентів, відбувається нерівномірне розподілення компонентів сплаву за перерізом виливка. Це явище має назву ліквації. При пластичній деформації зливків та термічній обробці нерівномірність розподілення компонентів знижується частково, але решта ліквації може викликати нерівномірний розподіл властивостей за перерізом деталі, знижувати довгочасність та надійність розпорки триангеля. У зв'язку з цим визначенню ліквації компонентів сталі здавна приділялася велика увага.

Для виявлення макроструктури виливка застосовували реактив Гейна, що являє собою розчин 85 грамів хлорної міді  $\text{CuCl}_2$ , 53 грами хлористого амонію  $\text{NH}_4\text{Cl}$  у  $1000 \text{ см}^3$  води. Цей реактив найчастіше застосовується для виявлення ліквації фосфору в сталі, але він дає хороші результати і при виявленні загальної неоднорідності у виливках. Результат травлення цим реактивом розпорки триангеля представлені на рисунку 3.1.

Як видно макроструктура виливка розпорки триангеля є порівняно однорідною. Проте, в центральній зоні, після травлення, спостерігається темна зона з більш грубою макроструктурою, що пов'язано з неоднорідним процесом кристалізації виливка. Така неоднорідність макроструктури є причиною виникнення концентраторів напружень при роботі важеля розпорки

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

та викликає появу нерівномірності розподілу напружень, що при екстремому гальмуванні може бути причиною раптового руйнування. Це приводить до виходу з ладу одного з триангелів гальмівної системи візка вагону.



а

б

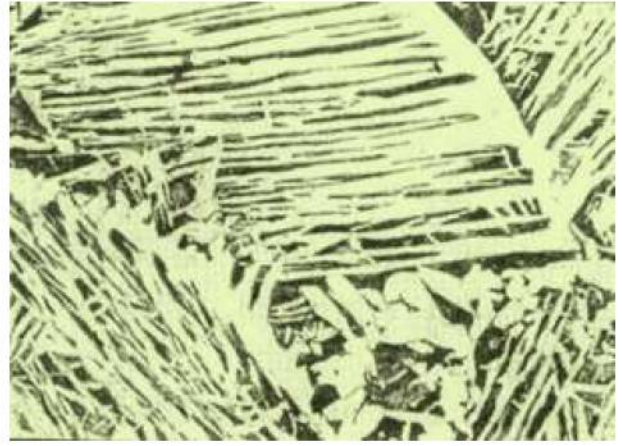
Рисунок 3.1 – Макроструктура темплету виливка, вирізаного з опорного плеча важіля: а – не травлена поверхня; б – після травлення

Вивчаючи макроструктурний стан виливка важіля можна зробити висновок про відсутність тріщин, порожнин та інших об'ємних просторових дефектів литва. Суцільність металу є великою, пористість відсутня. У центральній частині важеля на травленій поверхні темплету спостерігається неоднорідність травлення, з присутністю грубих темних ділянок. Це може вказувати на неоднорідність кристалізації виливка.

Як видно з рисунку 3.2 мікроструктура виливка важіля розпорки у литому стані характеризується ферито-перлітною будовою. Причому кількість перліту в структурі виливка, за результатами кількісного аналізу при збільшенні  $\times 100$ , складає близько 35 %, що не характерно для рівноважних структур сталі 20ФЛ. Присутність значної кількості евтектоїду пояснюється прискореним охолодженням виливка від температур повного затвердіння. Такий нерівноважний стан сталі 20ФЛ характеризується також неоднорідністю розподілу фериту з наявністю зон типової відманштетової структури. Це викликає неоднорідність механічних властивостей, з формуванням підвищеної крихкості виливків.



а



б

Рисунок 3.2 – Мікроструктура вилівка важіля зі сталі 20ФЛ:

а – збільшення x100; б – збільшення x500

За великих збільшень мікроскопу (x500) чітко видно, що евтектоїд у литому стані розподіляється переважно по границям зерен колишнього аустеніту. Ці зони не вигідно врізаються в  $\alpha$ -фазу сталі. В центральній зоні нерівномірність структури вилівка підвищується.

Для зменшення залишкових напружень, а також підвищення пластичності та в'язкості вилівка важіля розпорки з низьколегованої сталі 20ФЛ рекомендується провести нормалізаційний відпал при температурах вищих критичної  $A_{c3}$ . За таких температур розвиток інтенсивних процесів дифузії дозволить отримати структуру сталі близьку до рівноважної, з більшою в'язкістю.

### 3.2. Вплив відпалювання на структуру вилівоків

Термічна обробка відпалювання зразків, що були вирізані з вилівоків важіля візка виконувалась згідно прийнятої методики. Нагрів здійснювали, попередньо завантаживши зразки у електричну камерну піч, швидкість нагрівання не перевищувала 300 °С/год. Після прогріву зразків до температур дифузійних перетворень 920...950 °С, їх витримували біля однієї години для завершення структурних перетворень. Далі виймали з печі та охолоджували на повітрі, розмістивши на термостійкій підкладці.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Високі температури нагрівання сприяють розвитку інтенсивних процесів дифузії як атомів вуглецю, так і заліза. Це суттєво впливає на структурні перетворення у литій сталі 20ФЛ. Крім зняття залишкових напружень, що формуються під час кристалізації виливків, знімається нерівноважна неоднорідна структура литого металу та частково явища ліквідації. За таких змін метал має набувати меншої твердості, більшої пластичості та в'язкості.

Для отримання однорідної структури литих сталей частіше застосовують дифузійний відпал. Проте, у випадку незначного ступеня неоднорідності макроструктури, часто рекомендують проводити нормалізаційний відпал, особливо для низьковуглецевих сталей.

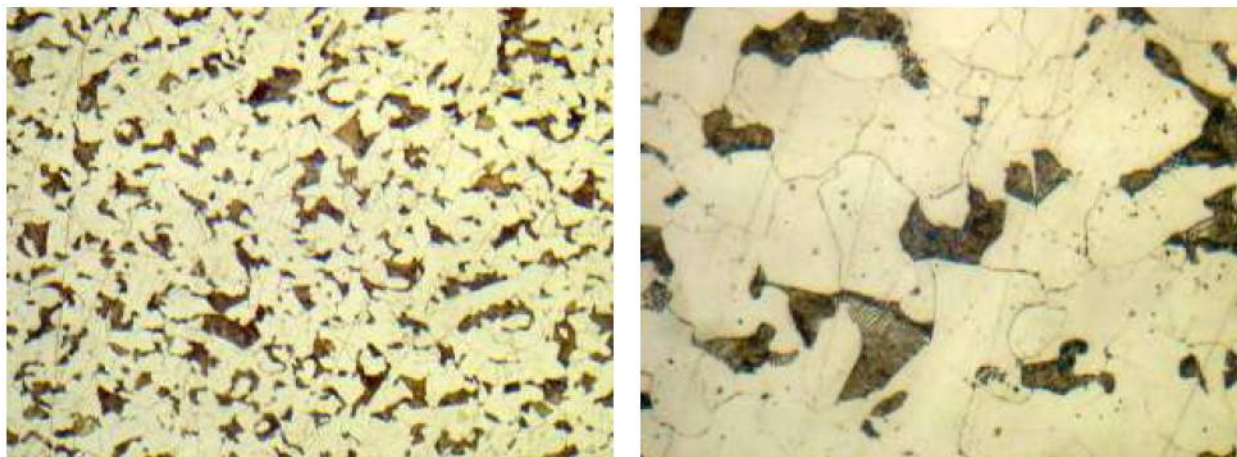
Оскільки макроструктура виливка важеля розпорки є порівняно однорідною з незначною нерівномірністю розподілу структурних складових, то більш доцільним способом досягнення однорідної рівноважної структури є нормалізаційний відпал. Часові і особливо енергетичні затрати на проведення цього виду відпалу є меншими, отже цей вид відпалу буде більш економічно вигідним.

Для визначення можливості застосування нормалізаційного відпалу виливка розпорки триангеля для підвищення однорідності структури в дипломному проекті проводили дослідження впливу такої термообробки на структуру сталі 20ФЛ. В дослідженні використовували серію зразків вирізаних з виливка розпорки з різних зон, всього 20 зразків.

Для нормалізаційного відпалу в муфель печі завантажувався по 5 зразків. В центральний отвір кришки печі вставляли штуцер для подання газової суміші екзотермічного типу. Таким чином в середині стакану створювалась захисна атмосфера. Нагрів зразків проводили до температур 920...950 °С, при яких в тигель печі подавали реагент. Температуру в тиглі контролювали хромель-алюмелієвою термопарою типу ТХА 1879. Термо-е.р.с. термопари вимірювали за допомогою мілівольтметра, класу точності 0,05, з поправкою на холодні кінці термопари.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Після прогрівання зразків до температури цементації (920...950 °С) та необхідної витримки їх виймали з печі та охолоджували на повітрі. Далі з термооброблених зразків підготовлювали мікрошліфи та досліджували зміни мікроструктури (рисунок 3.3).



а

б

Рисунок 3.3 – Мікроструктура сталі 20ФЛ після нормалізаційного відпалу: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$

Як видно з представлених структур нормалізаційний відпал при температурах 920...950 °С забезпечує отримання структури сталі 20ФЛ, яка характерна типовому структурному стану низьковуглецевих сталей. Кількість перліту в сталі значно зменшується та становить близько 20 %. Структура характеризується однорідністю щодо розподілу складових та нормальним зерном як перліту, так і фериту сталі. Твердість сталі відповідає стандарту та становить  $HV=2000...2200$  МПа. Отже, проведення нормалізаційного відпалу на заміну дифузійному є доцільним.

### 3.3. Твердість виливків після литва та термічної обробки

Твердість визначали на зразках сталі 20ФЛ, що вирізані безпосередньо з виливків важіля, та на тих зразках, які піддавались термічній обробці за режимом відпалу нормалізації. Оцінку значень виконували за декількома місцями вимірювання з усередненням отриманих значень твердості.



Після проведення відпалу зразків литої сталі 20ФЛ за температур 920...950 °С твердість зменшується до значень обумовлених технічними вимогами на сталеве литво з низьковуглецевих конструкційних сталей для вагонобудування. За отриманими значеннями видно, що тривалість витримки доцільно вибрати 1 годину. За менших значень твердість заеншується незначно, що відповідає повному завершенню структурних перетворень у сталі. Збільшення витримки до 1,5 години практично не дає помітного зменшення твердості, в порівнянні зі зразками, які відпалювали на протязі однієї години.

Отримані значення твердості сталі 20ФЛ свідчать про зняття внутрішніх напружень та проходження повних структурних перетворень у сталі, з формуванням нормалізованих структур. Такий стан дозволить значно зменшити крихкість сталі, підвищити її пластичність та в'язкість. Також висока пластичність сприятиме можливому механічному наклепуванню за умо поверхневого деформаційного зміцнення під час обробки шротом.

					<i>БР 0625.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		38

РОЗДІЛ 4  
ВПЛИВ ОБРОБКИ ШРОТОМ НА СТРУКТУРУ ТА  
ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 20ФЛ

4.1. Вплив обробки шротом на стан поверхні зразків

Для проведення порівняльного аналізу щодо впливу обробки шротом відпалених зразків сталі 20ФЛ, у роботі досліджували зразки після відпалювання без шротометної обробки та зразки, які після відпалювання піддавались поверхневій обробці шротом. Як відомо обробки та бомбардування сталевим шротом виливків часто застосовується у иварному виробництві та після високотемпературної обробки сталей в звичайних атмосферах, коли на їх поверхні утворюється значний шар окалини.

Як видно з пердставлених на рисунку 4.1 макрозображень поверхні зразків, стан поверхні після бомбардування шротинами зазнає значних змін. Ці зміни залежать від інтенсивності обробки, яка в свою чергу визначається енергією удару шротин та часом обробки.

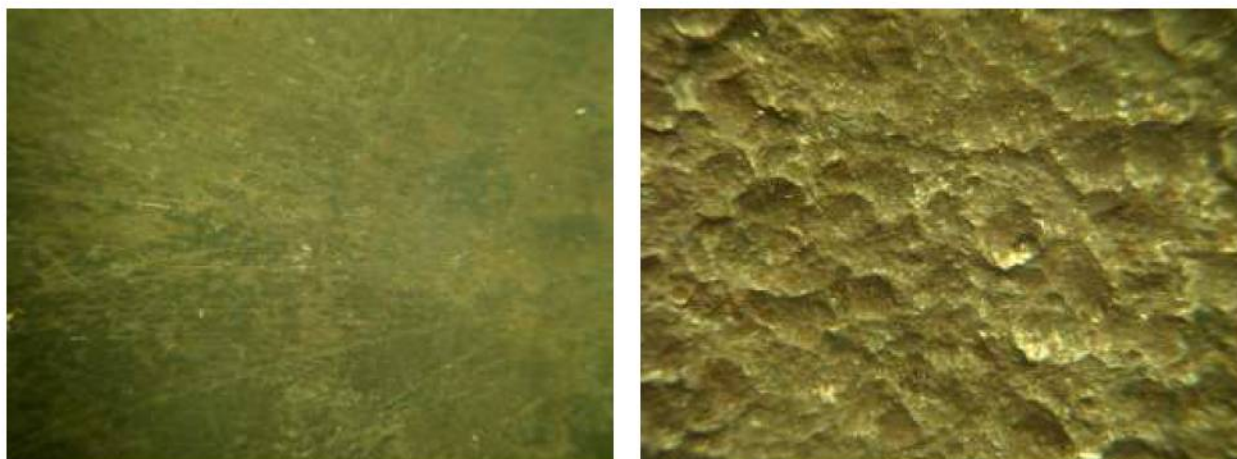


Рисунок 4.1 – Макрознімок поверхні зразків сталі 20ФЛ після відпалу (а) та після шротометної обробки (б), час обробки 3 хвилини

Енергія удару шротини залежить від швидкості та її маси. Для прийнятих значень маси сталевих шротин 0,3...0,5 мм енергія її удару досягає значень 0,15...0,2 Дж, для постійної швидкості її руху до 50 м/с, що забезпечується швидкістю повітряного потоку за шротоструменевого

оброблення на стаціонарному обладнанні. За такої енергії вже при тривалості обробки на протязі однієї хвилини, на поверхні відпаленого зразка сталі 20ФЛ формується характерний рельєф, з кратерами від удару кульок. Це суттєво впливає на структурний стан металу після шротоструменевого оброблення.

Форма заглиблень від шротин може залежати від їх спрямування на поверхню, що пояснює схема на рисунку 4.2.

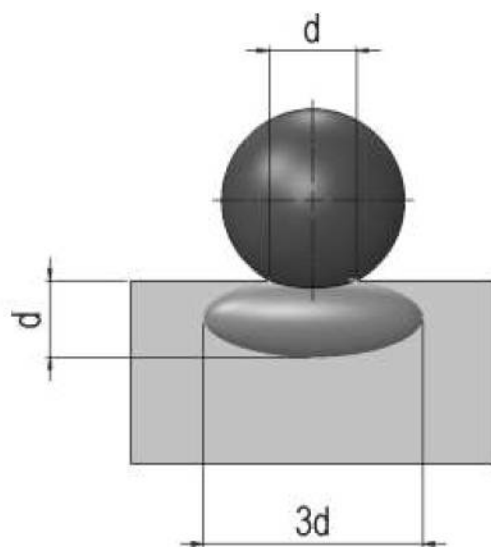


Рисунок 4.2 – Можливі розміри лунок від удару шротин

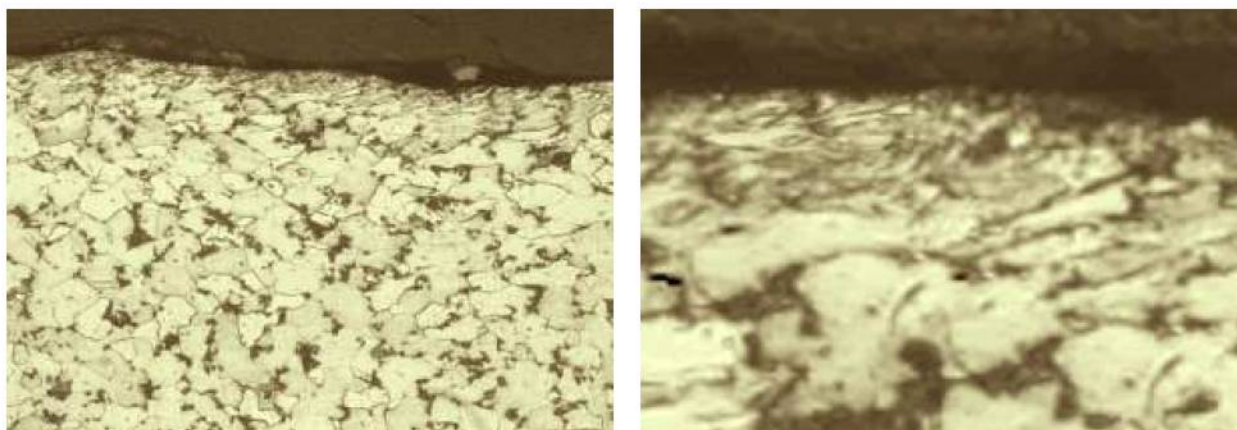
Ця ситуація залежить від кута нахилу активного сопла шротоструменевого апарату. Коли кут нахилу до поверхні становить  $45^\circ$ , шротина при вдарянні може залишати слід довжиною до трьох її діаметрів. Це слід враховувати за ручної роботи під час оброблення. Бажано кут нахилу не збільшувати понад  $15^\circ$  відхилення від нормалі до оброблюваної поверхні.

#### 4.2. Структура сталі 20ФЛ після обробки шротом

Оскільки шротоструменева обробка впливає на поверхню виробів, то структурні дослідження виконували на зразках, які були залиті бакелітом. Ці зразки сталі під час підготовки шліфування та полірування не зазнають завалів та скруглень крайніх на сторонах поверхні шліфа, що покращує чіткість

зображень структури за використання оптичної металографії.

Дослідження структури поверхневих шарів (рисунок 4.3) виконували за збільшень мікроскопа у 100 та 500 разів.



а

б

Рисунок 4.3 – Мікроструктура поверхневого шару сталі 20ФЛ після обробки сталевим шротом: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$

На отриманих зображеннях мікроструктури видно помітне спотворення зернистої рівноосної будови зерен фериту та ділянок перліту у поверхневих шарах досліджуваних зразків, які зазнавали обробки шротом. Форма спотворення та його ступінь відповідає заглибленням сформованим у наслідок удару шротин. У місцях де ці заглиблення більші спостерігається більша інтенсивність спотворення деформованого шару та більший ступінь витягування зерен фериту сталі. Інтенсивність спотворення також більше розповсюджується у глиб металу.

При великих збільшеннях мікроскопу можна чітко бачити, що на поверхні формуються шари металу, що розміщені уздовж площини поверхні. Зерна фериту розтікаються паралельно до поверхні, на яку діяли шротини під час обробки. Додатковими вимірюваннями, з використанням об'єкт-мікромметра мікроскопу встановлено, що товщина спотвореного шару усередньому сягає 200...500 мкм.

Виконані спостереження дозволяють зробити висновок, що глибина проробленого шару сталі, який зазнав помітної деформації, залежить від стану поверхні до обробки. Високотемпературний відпал за температур

900...950 °С, значно зменшуючи твердість сталі, сприяє більш інтенсивному розвитку деформаційних процесів під час шротоструменевої обробки. Це можна використати для зміцнення поверхні готових виробів, які працюють з контактом з абразивними частками в атмосферних умовах та зазнають ерозії.

#### 4.3. Властивості сталі 20ФЛ після обробки шротом

рнерн

Як видно з результатів представлених на рисунку 4.4 кінетична енергія шроту суттєво впливає на твердість поверхневих шарів відпаленої сталі 20ФЛ в процесі шротометної обробки. Видно, що чим більші значення кінетичної енергії, тим менший час необхідний для досягнення високих показників деформаційного зміцнення.

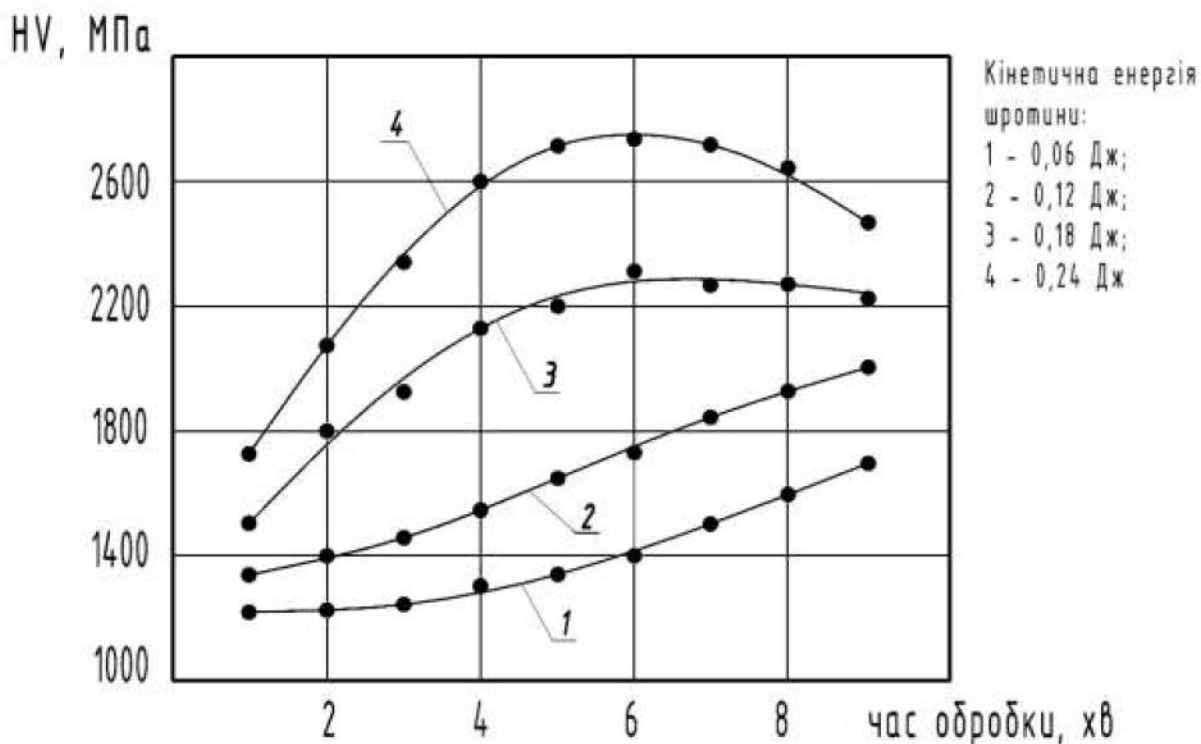


Рисунок 4.4 – Вплив часу шротоструменевої обробки та кінетичної енергії шроту на твердість поверхневого шару сталі 20ФЛ

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 0625.00.00.000 ПЗ

Арк.

42



явище розтріскування металу у випадку динамічних знакозмінних навантажень. Зокрема випробування на знакозмінний згин (рисунок 4.6) стандартних зразків сталі 20ФЛ свідчать про підвищення межі витривалості зразків, які перед випробуваннями піддавали шротоструменевому зміцненню.

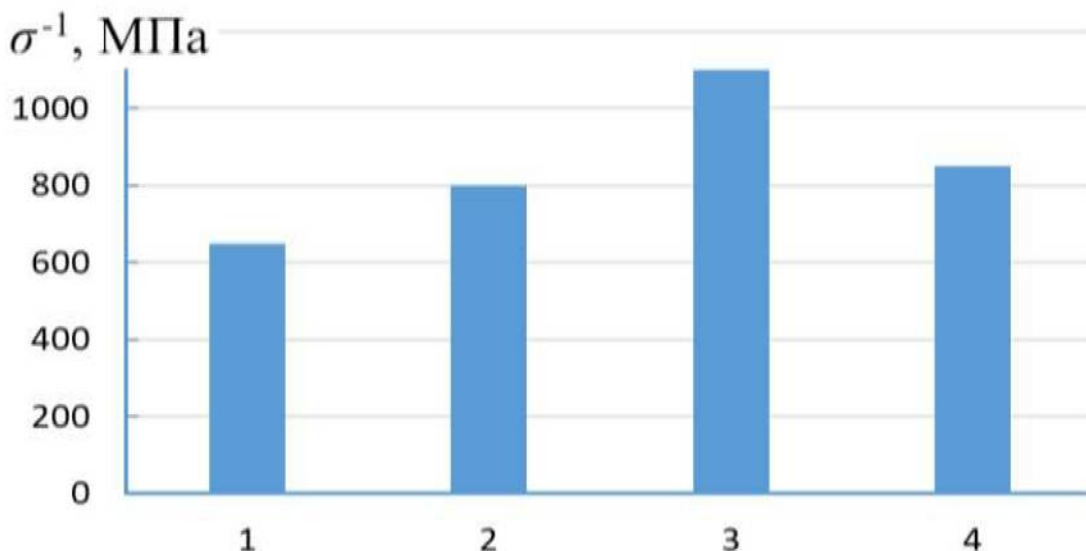


Рисунок 4.6 – Гістограма значень межі витривалості сталі 20ФЛ до (1) та після режимів обробки шротом: 2 – 3 хв.; 3 – 5 хв.; 4 – 8 хв.

З отриманих результатів гістограми межі витривалості видно, що для низьковуглецевої сталі зі структурою після високотемпературного відпалу, яка є близькою до рівноважної, оптимальним часом обробки шротом є 5 хвилин. Цього часу достатньо для отримання зміцнення поверхні сталі, зі збільшенням витривалості за знакозмінного згину більш ніж в півтора рази. Збільшення часу обробки навпаки приводить до зменшення цього показника. Такі показники витривалості забезпечуються завдяки заміні напружень розтягу на напруження стиску за шротоструменевого оброблення поверхні сталі.

## ВИСНОВКИ

Отримання рівноважних структур виливків зі сталі 20ФЛ після нормалізаційного відпалу приводить до формування невисоких показників деяких механічних властивостей, серед яких твердість поверхні. Показники твердості впливатимуть на спрацювання робочих елементів, що для деталей вагонних візків є досить актуальним. Постійний контакт з пилом, абразивними частинками викликає інтенсивне спрацювання робочих ділянок важеля розпорки, що виводить механізм гальмування візка з ладу.

Оскільки звичайні термічні способи зміцнення для низьковуглецевої сталі 20ФЛ є не ефективними, а спеціальні способи зміцнення, зокрема хіміко-термічна обробка – економічно не вигідними, то єдиним способом зміцнення може бути деформаційне поверхневе зміцнення. Найвигідніше здійснити цей спосіб в умовах виробничої діяльності більшості машинобудівних підприємств та ливарних дільниць можна, застосувавши шротоструменеву або шротометну обробку виливків. Шротоструминна обробка дозволяє швидко і якісно провести поверхневе зміцнення всіх ділянок виробу, а також виконати очищення у випадку забруднення поверхні виливків окалиною після операцій високотемпературного відпалювання, дифузійного відпалу, нормалізації тощо.

Для проведення операцій та процесів шротоструминого оброблення сталевих фасонних виливків можна використовували шротоструминні шафи або шротометні машини стаціонарного типу. Для встановлення оптимальних умов обробки слід оптимізувати енергію та час оброблення. На основі отриманих в роботі результатів досліджень та їх аналізу, для сталі 20ФЛ доцільно застосувати шротоструменеву обробку зі швидкістю шротин, діаметром 3...5 мм, 50...80 м/с, та тривалістю обробки 3...5 хвилин.

Збільшення часу обробки для відпаленої сталі 20ФЛ з твердістю не вище  $HV=2200$  МПа, приводить до значного зростання кількості дефектів в поверхневих шарах виробу. Надалі ці об'єми перезміцнюються з значним

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

ростом дислокаційних дефектів до критичних значень, набуваючи значної рихлості з присутністю мікро-, а іноді і макротріщин. Ці дефекти виступають концентраторами напружень та зменшують в'язкість і міцність сталі. У випадку меншої тривалості обробки наклепаний щар має незначну товщину та ступінь зміцнення його невисока.

Отримані в роботі практичні результати можуть бути запропоновані для удосконалення технологічних процесів виготовлення сталевих виливків з низьковуглецевих ливарних сталей, зокрема на ПрАТ "Нововолинський ливарний завод".

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борзилов І. Д., Равлюк В. Г., Рибін А. В. Технологія вагонобудування та ремонту вагонів. Технологія ремонту основних вузлів вагонів: Конспект лекцій. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 61 с.
2. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 2017. – 157 с.
3. Фомін О. В. Дослідження дефектів та пошкоджень несучих систем залізничних напіввагонів: монографія / О.В.Фомін. – Київ: ДЕТУТ, 2021. – 299 с.
4. Підвищення довговічності циліндричних деталей колісних візків залізничних вагонів / І. С. Афтаназів, Л. І. Шевчук, О. І. Строган, Л. Р. Струтинська, І. В. Строган // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2021. – №. 1. – С. 136-145. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.234478>
5. Волошин Д. І., Волошина Л. В. Новітні технології та матеріали у вагонобудуванні: Конспект лекцій. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – 86 с.
6. ДСТУ 8781:2018 Виливки зі сталі. Загальні технічні умови / 3 поправкою 1, 2. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 2018. – 44 с.
7. Заготовки у машинобудівному виробництві: навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2022. – 148 с.
8. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: навчальний посібник / В. О. Іванов, Б. А. Ступін, Х. В. Берладір. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 189 с.
9. Технології та устаткування машинобудівних виробництв. Виробництво заготовок: навч. посібник для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / Укладачі: Комар Р.В., Паньків М.Р., Сенчишин В.С. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. – 152 с.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

10. Металознавство: навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.

11. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, Я.О.Ковальчук, І.В. Коваль – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с.

12. 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.

13. Basdeki, M.; Apostolopoulos, C. The Effect of the Shot Blasting Process on the Dynamic Response of Steel Reinforcement. *Metals* 2022, 12(6), 1048. <https://doi.org/10.3390/met12061048>.

14. Gencalp, I., Koroglu, B., Sokol, D. (2021). Influence of Laser Peening With and Without Coating on the Surface Properties and Stress Corrosion Cracking Behavior of Laser-Welded 304 Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions, A*. 52(12). <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06294-6>.

15. Горик О. В., Черняк Р. Є., Чернявський А. М., Брикун О. М. Дробоструминне очищення. Теорія і практика / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора]. Полтава: Видавництво ПП «Астрія», 2021. 326 с.

16. Attolico, M.A., Barile, C., Casavola, C. et al. Effects of Laser Shock Peening on Surface Roughness and Residual Stress of AA 7050-T7451. *J. of Materi Eng and Perform* 31, 7973–7988 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06857-7>.

17. Sarukasan D, Thirumavalavan K. Influencing laser shock peening treatment of the mechanical, tribological, corrosion, and microstructural characteristics on AA5052 alloy. *Surface Engineering*. 2024;40(9-10):945-966. <https://doi.org/10.1177/02670844241287346>.

18. Методи зовнішнього впливу на чавунні виливки для отримання їх диференційованих механічних властивостей / П.Б. Калюжний, В.С.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Дорошенко. Метал та лиття України: Том 30, 2022, № 3 (330), 88-95,  
<https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.088-095>.

19. Пожарова О. В. Охорона праці: навчальний посібник / О. В. Пожарова. – Одеса, 2022. – 86 с.

20. Безпека життєдіяльності та охорона праці: підручник: у 2 ч. / Я.О. Серіков, Л.Ф. Коженевські, М.В. Хворост; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова [та ін.]. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова; Краків: ЄАС, 2021. – 220 с. ISBN 978-966-695-528-2.

21. Проектування засобів індивідуального захисту працюючих : навч. посіб. / В.І. Голінько, Л.Д. Третьякова, С.І. Чеберячко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. 181 с.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49