

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

Вплив гартування на структуру та властивості
помольних куль зі сталі 70Г / The influence of
hardening on the structure and properties of
grinding balls made of steel 70Г

спеціальності 132 "Матеріалознавство"

освітня програма "Матеріалознавство"

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ-41
Корнійчук Роман Олександрович

(підпис)

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

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 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: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“ 03 ” 01 2026 року

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

Корнійчуку Роману Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив гартування на структуру та властивості
помольних куль зі сталі 70Г*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 12 2025 року № 02 540/01-

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« 19 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *Зразки матеріалу (сталі 70Г), кулі помольні
штамповані, опис технології, технічні умови, стандарти*

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

*опис методики досліджень, розробка режиму гартування; вивчення
штампованих заготовок помольних куль; дослідження впливу гартування
на структуру та властивості помольних куль зі сталі 70Г; висновки*

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

*1 слайд – Характеристика сталей для куль барабанних млинів; 2 слайд –
зразки для аналізу та випробувань; 3 слайд – мікроструктура зразків у
стані поставки; 4 слайд – твердість куль до гартування; 5 слайд –
гартування зразків помольних куль; 6, 7 слайди – вплив гартування на
структуру помольних куль зі сталі 70Г; 8 слайд – вплив гартування на
твердість помольних куль зі сталі 70Г; 9 слайд – висновки.*

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання «03» 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Аналіз літературних джерел.</i>	<i>05.05.2026</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>12.05.2026</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>19.05.2026</i>	

Здобувач вищої освіти _____ Корнійчук Р.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Гусачук Д. А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Корнійчук Р.О. Вплив гартування на структуру та властивості помольних куль зі сталі 70Г. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП "Матеріалознавство" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

У розділах роботи висвітлено: особливості застосування помольних сталевих куль у барабанних млинах для помолу будівельних сумішей, на основі аналізу досвіду гартування помольних куль поставлено мету та завдання дослідження вплив гартування на структуру та властивості сталі 70Г; методику експерименту та дослідження; результати досліджень впливу гартування на структуру помольних куль зі сталі 70Г; результати вимірювання твердості помольних куль; практичні рекомендації щодо вдосконалення процесу гартування помольних куль зі сталі 70Г. Текстова частина роботи містить 53 сторінки тексту, 19 рисунків, 4 таблиці, 13 літературних джерел та посилань, 1 додаток у вигляді презентації результатів досліджень. Презентація представлена на 8 слайдах.

В кваліфікаційній роботі досліджено вплив температури гартування сталі 70Г, за швидкісного нагріву СВЧ, на структуру та твердість помольних куль для барабанних млинів. Встановлено, що оптимальною температурою нагріву для штампованих помольних куль, виготовлених з конструкційної сталі 70Г, є температура 850 °С.

Ключові слова: барабанні млини, кулі помольні, високовуглецева сталь, гартування, нагрів СВЧ, структура, твердість.

					БР 1126.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Корнійчук			Вплив гартування на структуру та властивості помольних куль зі сталі 70Г / The influence of hardening on the structure and properties of grinding balls made of steel 70Г	Літ.	Арк.	Акрушив
Перевір.		Гусачук					3	53
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ-41		
Н. Контр.		Мисковець						
Затверд.		Імбирович						

ANNOTATION

Korniychuk R. The influence of hardening on the structure and properties of grinding balls made of steel 70Г. Manuscript.

Qualifying work of a bachelor of the Educational Program "Materials Science" in the specialty 132 "Materials Science". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used and appendices.

The sections of the work highlight: the features of the use of grinding steel balls in drum mills for grinding building mixtures; based on the analysis of the experience of hardening grinding balls, the goal and objectives of the study of the effect of hardening on the structure and properties of 70G steel were set; the methodology of the experiment and research; the results of research on the effect of hardening on the structure of grinding balls made of 70G steel; the results of measuring the hardness of grinding balls; practical recommendations for improving the process of hardening grinding balls made of 70G steel. The text part of the work contains 53 pages of text, 19 figures, 4 tables, 13 literary sources and references, 1 appendix in the form of a presentation of the research results. The presentation is presented on 8 slides.

The qualification work investigated the effect of the quenching temperature of 70Г steel, during rapid microwave heating, on the structure and hardness of grinding balls for drum mills. It was established that the optimal heating temperature for stamped grinding balls made of 70Г structural steel is 850 °C.

Key words: drum mills, grinding balls, high-carbon steel, hardening, microwave heating, structure, hardness.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вум.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Застосування та особливості роботи кульових млинів	8
1.2. Характеристика та особливості роботи сталевих помольних куль	10
1.3. Аналіз сталей для помольних куль.....	12
1.4. Термічна обробка сталевих помольних куль	14
1.5. Опис ефективних способів підвищення надійності помольних куль.....	17
1.6. Мета та завдання кваліфікаційної роботи	18
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	20
2.1. Підготовка зразків для проведення досліджень.....	20
2.2. Методика дослідження макро- та мікроструктури зразків	21
2.3. Термічна обробка зразків сталі 70Г	26
2.4. Методи оцінки механічних властивостей зразків.....	28
2.5. Методи засоби обробки результатів досліджень	30
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРА ПОМОЛЬНИХ КУЛЬ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ	33
3.1. Структура та властивості прокату сталі 70Г	33
3.2. Вплив гарячого штампування на структуру куль	35
3.3. Поверхнева твердість штампованої кулі	36
3.4. Оцінка об'ємної твердості за січенням кулі	38
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ГАРТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОМОЛЬНИХ КУЛЬ	40
4.1. Особливості гартування сталі 70Г з використанням струмів високої частоти.....	40
4.2. Вплив гартування на макроструктуру гарячештампованих куль	42
4.3. Мікроструктура загартованих куль після відпуску	43
4.4. Вплив температури гартування на твердість помольних куль	47

4.5. Розробка рекомендацій щодо оптимізації процесу гартування помольних куль зі сталі 70Г	49
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52
ДОДАТКИ	

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Сталеві помольні (молотьні) кулі – це високоміцні елементи сферичної форми, що використовуються в барабанних млинах для дроблення, подрібнення та стирання матеріалів (руда, вугілля, цемент). Вони забезпечують ефективний помел у гірничодобувній та цементній промисловості завдяки твердості та зносостійкості. Кулі виготовляються з легованих сталей, розміри варіюються від 15 до 125 мм.

Кульові млини є основним обладнанням для тонкого подрібнення твердих матеріалів (руд, цементу, кераміки, вугілля, скла) до порошкоподібного стану (порошки, суспензії). Завдяки наявності тіл, що мелють (сталевих, чавунних, керамічних помольних куль) всередині барабана, що обертається, створюються ідеальні умови для подрібнення крихкої сировини. Кульові млини можуть використовуватися для сухого та мокрого помелу, а також для змішування та гомогенізації компонентів. Подрібнення порід та каміння відбувається за рахунок удару та стирання матеріалу кулями при обертанні барабана млина. Кульові млини забезпечують високий ступінь подрібнення, надійні в експлуатації та дозволяють отримувати матеріали з розміром частинок від десятків до кількох мікрон.

У процесі подрібнення помольні кулі зазнають інтенсивного спрацювання від циклічних ударів, абразивної ударної дії матеріалу подрібнення, сколів, тріщин та інше. Тому, в процесі виготовлення куль млинів слід забезпечити високу контактну міцність не лише поверхні кулі, а і поверхневого шару матеріала кулі на знану глибину. Для сталевих кованих, штампованих чи литих куль це забезпечується відповідною термічною обробкою. Покращити якість такої обробки можна дослідивши вплив гартування на структуру та основні властивості відповідної сталі, з якої виготовлена куля, що є основним завданням даної роботи.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Застосування та особливості роботи кульових млинів

Кульові млини в машинобудуванні використовуються для тонкого подрібнення різноманітних матеріалів [1, 2]. Їх часто застосовують під час виготовлення порошкових сумішей, механічного легування, а також отримання однорідних суспензій для лакофарбових і керамічних покриттів. Вони забезпечують високий рівень подрібнення (до кількох мікрон) порівняно твердих матеріалів, металевих і неметалевих руд тощо.

Основними областями застосування кульових млинів у машинобудуванні та суміжних галузях є:

- виробництво порошкових матеріалів, а саме подрібнення металевих порошків, кварцу, тальку, карбонату кальцію, необхідних для виготовлення деталей методами порошкової металургії;
- створення композитів: механічне легування (змішування порошків на молекулярному рівні) для отримання сплавів з унікальними властивостями;
- керамічна промисловість, переважно це подрібнення компонентів для виробництва вогнетривких виробів та керамічних деталей обладнання;
- лакофарбова промисловість, це зокрема диспергування пігментів та барвників, що забезпечує однорідність складу;
- будівельна галузь, у процесах виготовлення сучасних будівельних сумішей;
- фармацевтика та хімічна промисловість, це тонкий помел інгредієнтів, підготовка каталізаторів (цеоліти, оксиди металів та інше).

Застосування кульових млинів є більш вигідним в порівнянні з традиційними методами подрібнення завдяки їх ефективності в дробленні та помолі твердих частинок, зокрема і в рідких суспензіях [2].

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Кульові млини працюють за рахунок поєднання удару (падаючі кулі) та стирання (взаємне тертя частинок), забезпечуючи оптимальний розмір частинок матеріалу для подальших виробничих процесів. Їх використання у виробничих процесах має ряд переваг [3]: високий ступінь гомогенізації та тонкості помелу; універсальність: (можливість роботи з твердими та крихкими матеріалами); простота обслуговування та довговічність (при своєчасній заміні тіл, що мелють). Крім того, використання кульових млинів може скоротити час виробництва та енергоспоживання, зрештою підвищуючи загальну ефективність у промисловості.

Найбільш поширеним типом промислових кульових млинів є барабанно-кульові млини (рисунок 1.1). Основна деталь конструкції – це барабан, що обертається, частково заповнений кулями певного діаметру зі сталі, чавуну та інших сплавів, іноді з кераміки.

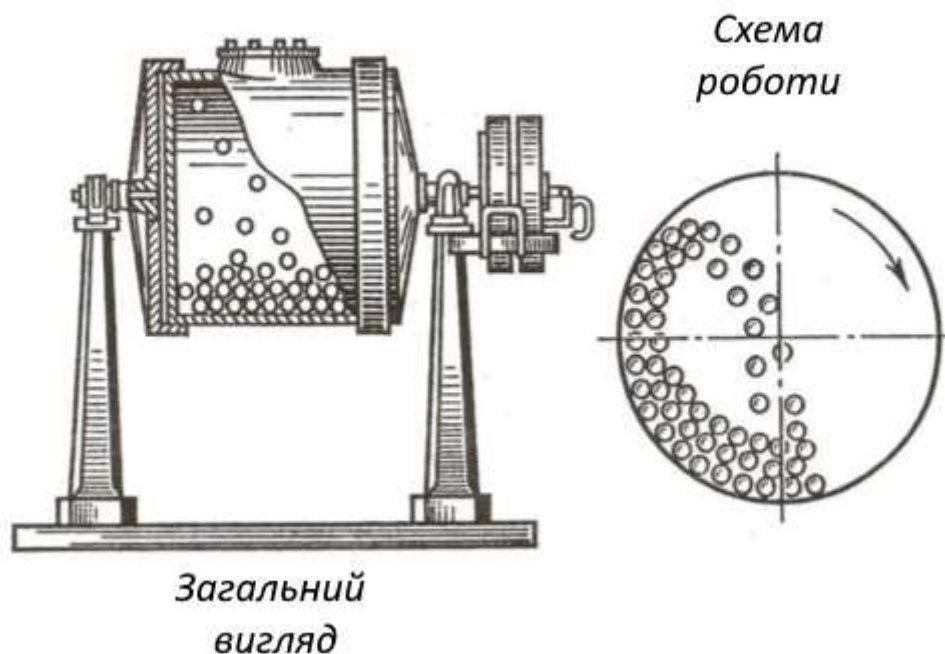


Рисунок 1.1 – Схема барабанно-кульового млина [2]

У промисловості іноді використовують кульові млини з безперервною подачею сировини на вході та з обробкою готового продукту на виході. На теплових електростанціях барабанно-кульові млини застосовуються для помелу вугілля, вугільний пил виноситься з млина підігрітим повітрям,

вентилятором, що нагнітається, при помелі одночасно відбувається підсушування палива. Кульові млини не можуть використовуватися для обробки деяких піротехнічних сумішей через можливість перебігу хімічної реакції та вибуху суміші.

Для потреб машинобудування та будівництва часто застосовують млини з кулями, що виготовлені з конструкційних легованих сталей. Тривалість роботи залежить від стікості помольних сталевих куль.

1.2. Характеристика та особливості роботи сталевих помольних куль

Помольні кулі є основними робочими тілами в кульових млинах, що забезпечують подрібнення матеріалів, шляхом ударної дії під час падіння та стирання при обертанні барабана машини. Ефективність їх роботи залежить від правильного розрахунку завантаження млина, твердості кулі, її діаметра та можливості автоматичного довантаження для компенсації зносу [3]. Довговічність їх роботи залежить від матеріалу кулі та зміцнюючої термічної обробки, параметри якої можуть суттєво вплинути на їх властивості.

Помольні кулі барабанних кульових млинів працюють в особливих умовах [4]. В більшості випадків кулі зазнають удару під час падіння з висоти для руйнування великих шматків матеріалу, а також стирання за умов перекочування, у випадку тонкого помелу серовини. Подрібнення матеріалу ударом відбувається тільки за рахунок прямого удару (рисунок 1.2), що обумовлений швидкістю, яка діє по лінії удару, тобто нормально по відношенню до поверхні млина або колової траєкторії зовнішнього (відносно даного) шару подрібнювальних тіл. Швидкість тіла, яка діє у дотичному напрямку, до удару не приводить і сприяє тільки переміщенню подрібнювального тіла вздовж колової траєкторії, при цьому подрібнення може здійснюватись роздавлюванням і стиранням.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

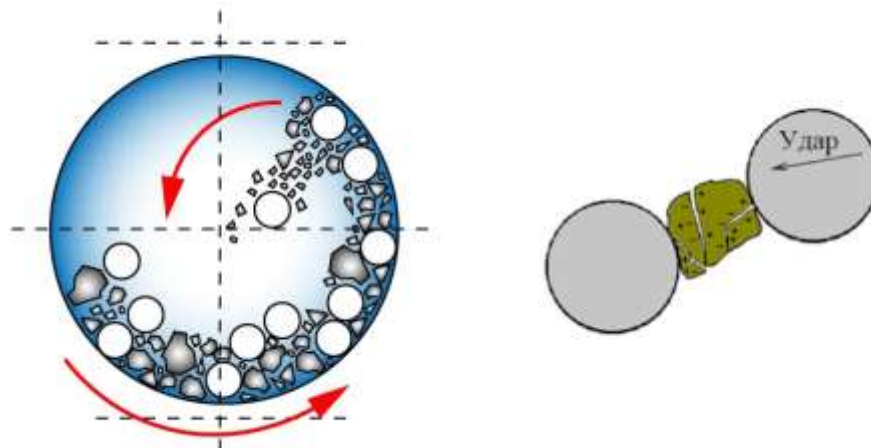


Рисунок 1.2 – Процес подрібнення в кульових млинах

Для роботи в таких умовах використовуються сталеві кулі різних груп твердості. Більші значення твердості зазвичай забезпечують кращу зносостійкість куль, проте низька твердість іноді доцільніша для особливих умов роботи. Також, помольні кулі зазнають постійного інтенсивного спрацювання поверхні в умовах абразивного стирання, дії контактних напруг, що вимагає регулярного або автоматичного довантаження, щоб підтримувати оптимальний режим роботи млина. Необхідно правильно розраховувати об'єм та розмірний тип куль (малі, середні, великі) для досягнення максимальної ефективності подрібнення. Нормальна робота залежить від швидкості обертання млина, яка визначає, чи будуть кулі підніматися та падати (каскадний або катарактний режим), чи прилипатимуть до стінок барабану млина.

Допустимо виготовлення куль зі сталей згідно з ДСТУ 3953:2000, відповідно до норм якого для виробництва куль можуть застосовуватись конструкційні високовуглецеві низьколеговані сталі, зокрема з підвищеним вмістом мангану: 60Г2, 65Г, 70Г. Маргнцеві сталі є найбільш дешевим типом сталей для куль млинів. Високий вміст вуглецю в цих сталях робить їх достатньо довгоічними та стійкими проти стирання та дії інтинсивних контактних напружень. На поверхні куль не допустимо тріщин та дефектів, які виводять розміри куль за граничні відхили. За згодою між виробником і споживачем кулі груп твердості 4 і 5 можна постачати з контрольованою

					БР 1126.00.000 ПЗ		Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			11

ударостійкістю. Контролювання ударостійкості виконують за методикою виробника.

Кулі діаметром менше ніж 40 мм, а за згодою між виробником і споживачем кулі будь-якого діаметра постачають у пакувальній тарі - контейнерах металевих та м'яких типу біг-бег, дерев'яних ящиках або іншій тарі згідно з чинним нормативним документом.

Прийнято вважати, що чим твердіші помольні кулі, тим вони більш якісні [5]. Однак, іноді виникають такі ситуації, коли для подрібнення матеріалу необхідно використовувати м'якші помольні кулі, наприклад, з твердістю на поверхні 48...50HRC. У більшості випадків це залежить від твердості матеріалу, що подрібнюється, та від стану і якості бронефутерування.

Діючі нормативні документи на сталеві помольні кулі [6] регламентують лише нижню межу діапазону твердості для кожної групи. Відповідно помольна куля повинна мати твердість не менше певного значення, для кожної групи це значення своє. Верхню межу діапазону твердості не регламентують. Тому, наприклад, для другої групи твердості (не менше 49 HRC), помольна куля буде мати твердість поверхні вище за ту, яку відповідає вимогам, наприклад, 65 HRC. В процесі використання подібних помольних куль може виникати умови, що призводять до їх розколу, збільшення витрати куль, псування технологічного обладнання, підвищеного зносу футеровки.

Сталеві помольні кулі класифікують за твердістю поверхні на шість груп: від нормальної до високої – 6 група, з технологією виробництва (прокатка, кування, лиття) та діаметром. Вони використовуються у млинах сухого або мокрого помелу для подрібнення матеріалів.

1.3. Аналіз сталей для помольних куль

Сталеві помольні кулі виготовляють з конструкційної сталі, в якій вміст вуглецю і вуглецевий еквівалент мають відповідати значенням від 0,5 до 0,85,

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

відповідно до умовного діаметру та групи кулі за потрібною твердістю. Масова частка вуглецю в них коливається в межах 0,4...0,8 % (таблиця 1.1). Допускається виготовлення куль з інструментальних легованих сталей [7].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей для помольних куль

Марки сталі	Вміст елементів, %						
	C	Si	Mn	Ni	Gr	S	P
60Г	0,57...0,65	0,17...0,37	0,9...1,2	≤0,40	≤0,25	≤0,035	≤0,035
65Г	0,62...0,70						
70	0,67...0,75		0,5...0,8	≤0,25			
70Г	0,67...0,75		0,9...1,2				

Для виготовлення помольних куль для гірничо-збагачувальних комбінатів доцільно використовувати сталі з більшим вмістом вуглецю, що забезпечує їх більшу експлуатаційну стійкість. З огляду на це, та у відповідності із завданням роботи для досліджень була вибрана високовуглецева сталь марки 70Г, з якої виготовляють помельні кулі на профільному підприємстві.

Підвищений вміст мангану в сталі 70Г дозволяє збільшити прогартовуваність, що важливо для куль середнього та великого діаметрів. Після зміцнюючої термічної обробки, яка включає гартування та відпускання сталь набуває високих показників міцності (таблиця 1.2) та стійкості проти спрацювання в умовах ударно-абразивного контакту з мінеральною породою. Таблиця 1.2 – Властивості сталей після гартування та середнього відпускання

Марка сталі	Механічні властивості				
	Тимчасовий опір (σ_s , МПа)	Межа текучості ($\sigma_{0,2}$, МПа)	Твердість (HRC)	Відносне видовження (δ_5 , %)	Відносне видовження (ψ , %)
60Г	950...980	735...785	52...60	8	30
65Г	950...980	755...785	55...65	8	30
70	980...1030	790...835	57...67	9	30
70Г	990...1030	810...835	55...65	7	25

Хімічний склад сталі 70Г та параметри механічної та термічної обробки (ТО) визначають її фізико-механічні властивості [7]. Після загартування з відпуском виріб зі сталі 70Г має хорошу поверхневу твердість, набуває пружності, міцності на стиск і здатності стійко сприймати значні вібрації, статичні та ударні динамічні навантаження. Однак сталь має невисоку прогартовуваність, тому великогабаритна продукція, до якої висувають вимогу наскрізного гартування, з неї не виробляється. Сталь може піддаватися різним видам термічної обробки: відпалу, нормалізації, загартування з відпусткою тощо. Параметри ТО вибираються в залежності від необхідного співвідношення показників ударної в'язкості, твердості та пружності, це дозволяє виготовляти з неї деталі під конкретні навантаження та умови експлуатації. Згідно ДСТУ 8429 для сталі 70Г рекомендується гартування за середньої температури 830 °С з наступним всереднім відпусканням за температурою 450...470 °С. Сталь 70Г погано зварюється. Її зазвичай не застосовують при виготовленні зварних конструкцій, а для отримання зварного з'єднання рекомендується використовувати точкове контактне та аргонодугове зварювання з подальшою термообробкою шва. Важливо пам'ятати, що для цієї марки властива мала корозійна стійкість і вона корродує під впливом агресивного середовища та їдких речовин.

1.4. Термічна обробка сталевих помольних куль

Після отримання необхідної форми та розмірів кулі піддають термічній обробці.

Основними видами термічної обробки, що змінюють структуру і властивості сталі в залежності від вимог, які висувають до напівфабрикатів і готових виробів, є: відпал, нормалізація, загартування, відпуск і старіння [9]. Відпал І-го роду в залежності від вихідного стану сталі і температури його виконання може включати процеси гомогенізації, рекристалізації і зняття додаткових напружень. Характерною особливістю цього виду відпалу є те, що

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

вказані процеси відбуваються незалежно від того чи протікають в сплавах при цій обробці фазові перетворення чи ні. Цей вид обробки в залежності від температурних умов його виконання усуває хімічну або фізичну неоднорідність, створену попередніми обробками.

Відпал II-го роду полягає в нагріві сталі до температур вище точок A_{c3} або A_{c1} , витримці і, як правило, наступному повільному охолодженні, в результаті якого фазові перетворення призводять до досягнення рівноважного структурного стану. Після відпалу вуглецевої сталі (доевтектоїдної) утворюється структура ферит та перліт. Такий структурний стан є оптимальним для механічної обробки сталі та обробки тиском.

Загартування полягає в нагріванні сталі на 30...50 °C вище A_{c3} для доевтектоїдних сталей, витримці для завершення фазових перетворень і наступному охолодженні зі швидкістю вище критичної. Для вуглецевих сталей таке охолодження найчастіше проводять у воді. Загартування не є кінцевою операцією термічної обробки. Щоб зменшити крихкість і напруження, викликані загартуванням, і отримати задані механічні властивості, сталь після загартування обов'язково піддають відпуску. Конструкційні сталі в основному піддають загартуванню для підвищення твердості, міцності; для ряду деталей також і високої зносостійкості.

Доевтектоїдні сталі нагрівають до температури на 30...50 °C вище точки A_{c3} (рисунк 1.3). В цьому випадку сталь з вихідною структурою перліт (П) + ферит (Ф) при нагріванні набуває структури аустеніту, яка при наступному охолодженні зі швидкістю вище критичної перетворюється в мартенсит.

Тривалість нагріву повинна забезпечувати прогрів виробів по перерізу і завершення фазових перетворень, але не повинна бути дуже високою, щоб не викликати ріст зерна і знеуглецьовування сталі. Основними параметрами режиму технологічних операцій термічної обробки є: температура (t_n) і час (τ_n) нагрівання, час витримання при заданій температурі (τ_b), час охолодження ($\tau_{ох}$). Час витримки за температури гартування повинен бути мінімальним, але

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

забезпечувати завершення фазових перетворень в сталі і необхідну концентрацію вуглецю в аустеніті [10].

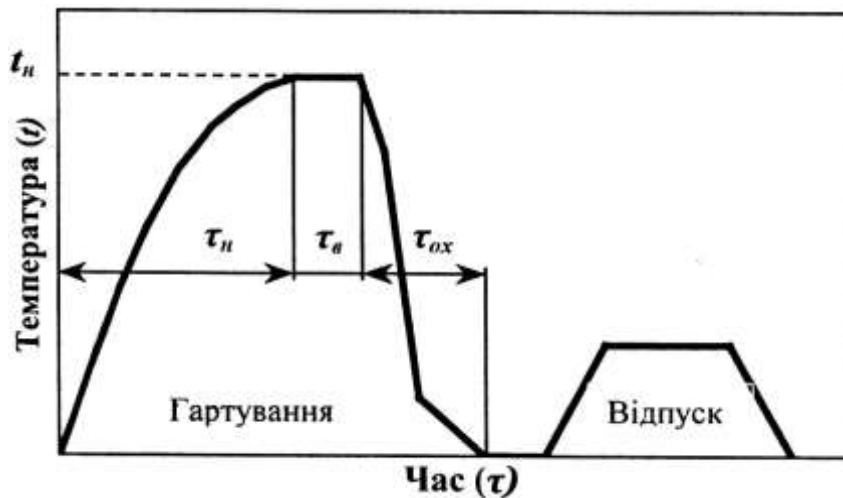


Рисунок 1.3 – Схема режиму послідовних операцій термічної обробки – гартування і відпуску

При нагріванні в полум'яних або електричних печах взаємодія пічної атмосфери з поверхнею виробу, що нагрівається, призводить до окислення і зневуглецювання сталі. Для попередження окислення виробів і зневуглецювання в робочий простір вводять захисне газове середовище (контролюючи атмосферу).

Охолодження при загартуванні повинно забезпечувати отримання структури мартенситу в межах заданого перерізу виробу (прогартуваність) і не повинно викликати за гартувальних дефектів: тріщин, деформацій, короблення. Технічно чиста вода застосовується з успіхом для загартування вуглецевих і низьколегованих сталей малої прогартуваності, якщо виготовлені з цих сталей металеві вироби, мають просту і мало чутливу до тріщин форму. Хоча помольні кулі мають просту круглу форму все ж для куль виготовлених з високовуглецевих сталей доцільно застосовувати рідкі оливи, що забезпечує м'якше охолодження та уникає ймовірності появи тріщин.

Відпуск полягає в нагріванні загартованої сталі до температури нижче A_{c1} , витримці при заданій температурі і наступному охолодженні з визначеною швидкістю. Відпуск є кінцевою операцією термічної обробки, в результаті

якого сталь отримує задані механічні властивості. Крім того, відпуск повністю або частково усуває внутрішні напруження, які виникли при загартуванні.

Основний вплив на властивості сталі робить температура відпуску. Для помольних куль (виготовлених із середньовуглецевих) застосовують середньотемпературний відпуск. Такий відпуск забезпечує високі межі міцності, достатньо високу твердість. Структура сталі після середнього відпуску – тростит відпуску або тростомартенсит. Температуру відпуску потрібно вибирати таким чином, щоб не викликати відпускнуї крихкості.

1.5. Опис ефективних способів підвищення надійності помольних куль

Одним із основних недоліків помельного обладнання взагалі і кульових млинів особливо є забруднення порошку продуктами зносу робочих частин (в тому числі помельних куль). В залежності від виду порошку, допустимої ступені забруднення і виду домішок застосовують наступні способи зменшення зносу куль і забруднення матеріалу: виготовляють барабан і помельні тіла (якщо це можливо) із того ж самого матеріалу, що й подрібнюваний матеріал або із близького йому за складом; наплавляють або напилюють на внутрішню поверхню агрегату захисні шари, [10] використовують змінні футерувальні плити із зностійкого матеріалу на гумовій основі.

Але основним із способів підвищення надійності помельних куль є вибір оптимального режиму термічної обробки сталі, яка використовується для виготовлення помельних куль. Так, наприклад, середньотемпературний відпуск забезпечує високі межі зносостійкості.

Великий вплив на надійність і довговічність куль млинів роблять також домішки в сталі. Сірка із залізом утворює сульфід FeS , який, в свою чергу, - легкоплавку евтектику. При плавленні цієї евтектики руйнуються зв'язки між зернами і виникають тріщини. А наявність в марганцевих сталях (60Г, 70Г) сульфиду марганцю MnS дозволяє уникнути цього дефекту.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Оскільки заготовки для помольних куль отримані методами гарячого штампування у відкритих штампах, одним з способів удосконалення всього процесу виготовлення куль може бути уникнення повторного нагрівання куль після процесу гарячого штампування. Така ідея є доцільною, адже штамповані кулі після обрізання заусенця не піддаються механічній обробці, тобто не вимагають проведення процесу відпалу чи нормалізації. Таким чином, за виконання незначного переоснащення технологічного процесу можна сумістити операції штампування з гартуванням. Це вимагає проведення дослідження температури аустенізації на структуру та властивості сталі 70Г в процесі гартування та наступного відпускання, адже штампування куль здійснюється від температур 1150...1200 °С, які значно вищі від стандартної температури гартування цієї сталі.

1.6. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Згідно з умовами роботи помельних куль, середовищами, в яких вони працюють, до них ставляться вимоги високої твердості, надійності, зносостійкості, оскільки кулі використовуються для дроблення шихтових, будівельних та інших матеріалів. Найкраще для таких робіт підходять кулі, виготовлені зі середньо вуглецевих сталей тому, що вони мають добрі технологічні властивості і не є дефіцитними.

Оптимальною термічною обробкою, яка дозволяє отримати вуглецеву сталь із заданими властивостями, є середньо температурний відпуск, який проводять при температурах на 30...50 °С вище A_{c3} .

До способів підвищення надійності помельних куль, окрім вибору оптимальної термічної обробки, відносять також і способи зменшення зносу куль і забруднення подрібнюю чого матеріалу за рахунок покриття барабану млина гумою.

Тому метою роботи дослідити вплив температури гартування на структуру та властивості штампованих помольних куль зі сталі 70Г, на основі

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

чого встановити можливість застосування високошвидкісного нагрівання з використанням струмів високої частоти.

Отже, завдання досліджень полягає в наступному:

- дослідженні макро- та мікроструктури сталевих заготовок до термічної обробки і куль, що пройшли термічну обробку;
- вимірювання твердості шліфів і порівнювання отриманих результатів із заданими;
- вивченні впливу термічної обробки на структуру та властивості помольних куль барабанних млинів;
- виборі оптимального процесу термічної обробки, яка забезпечувала б високу твердість та малу зносостійкість в складних умовах експлуатації.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Підготовка зразків для проведення досліджень

На сьогодні близько 90 % помольних куль промислових барабанних млинів виготовляються з вуглецевих конструкційних сталей. Основним елементом, від якого залежать властивості вуглецевих сталей, є вуглець. Для покращення процесів термічної обробки рекомендують застосовувати марганцеві сталі, з вмістом мангану 0,9...1,0 %.

Вуглецева сталь марки 70Г є складним залізовуглецевим сплавом, в склад якої входять: Mn, Si, Ni, Cr, S, P. Крім цього, в ній присутні приховані домішки, наявність яких не можна встановити звичайним хіманалізом [9]. Це O_2 , H_2 , N_2 і випадкові домішки, які потрапляють в сталь через забруднення шихтових матеріалів, які використовуються при плавленні сталі.

Для виявлення структури вуглецевої сталі дано зразки різних форм і розмірів, які виготовлені з готових помельних куль і заготовок, з яких ці кулі виготовляються. У завданні було дано зразки помольних куль умовного типорозміру 60 мм, що відповідає номінальному діаметру кулі 62,0 мм. Заготовки куль отримані методом гарячого штампування зі штучних заготовок, отриманих порізкою прокату сталі 70Г.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд досліджуваних зразків помольних куль. Праворуч розрізана навпіл куля

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Технологія гарячого штампування помольних куль є доволі поширеною коли немає необхідності у великій кількості виробництва куль. Заготовки перед пластичним формуванням у штампах нагрівають до температури 1150 °С, після чого проводять послідовне формування у рівчаках штампу. Така технологія є простою в порівнянні з литвом, та забезпечує гарну макробудову металу кулі, що покращує її експлуатаційні характеристики.

2.2. Методика дослідження макро- та мікроструктури зразків

Дослідження структурного стану зразків помольних куль виконували із застосуванням методів макро- та мікроаналізу.

Макроаналіз не є завершальним методом дослідження. Він лише дає змогу зробити попередній висновок про структуру металу і не виявляє багатьох особливостей його будови. Макроструктурою можна вивчати на таких об'єктах дослідження: на поверхнях виробів, заготовок (напівфабрикати, поковки, виливки тощо), зламах та на макрошліфах [11].

Макрошліфи – це вирізані з виробу або напівфабрикату зразки з плоскою шліфованою поверхнею, будову яких вивчають після травлення хімічними реактивами. Дослідження макрошліфів дає змогу розв'язувати широкий клас завдань при оцінці якості матеріалів.

Зразки для мікроаналізу вирізають із проби на металообробних верстатах або іншим способом. Вирізування зразків проводять у певному місці й у певній площині залежно від того, який об'єкт досліджують (литво, поковки, прокат, заготовки після штампування, зварні чи термічно оброблені деталі) і яка має стоїть перед дослідженням, наприклад, виявлення дефектів, що порушують суцільність металу, неоднорідність структури, первинну кристалізацію тощо [12]. Зразки вирізають з одного або кількох місць виливка, заготовки чи деталі як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Після цього зразки з невисокою твердістю обробляють на фрезерному або стругальному верстатах, а зразки з високою твердістю – на

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

плоскошліфувальному верстаті. Для отримання гладкішої поверхні зразки шліфують вручну шліфувальним папером грубої зернистості в одному напрямку. Після цієї операції зразки промивають проточною водою, просушують, знежирюють, тобто отримують макрошліф, який у подальшому піддають травленню. Агресивна дія реактивів неоднакова на різних ділянках макрошліфа [12]. Реактив активніше взаємодіє з тими ділянками макрошліфа, де наявні різного роду дефекти та неметалеві включення.

Підготовку поверхні, шліфування і полірування ведуть за допомогою абразивних матеріалів і інструментів. Абразивні матеріали являють собою здрібнені породи: природні (алмаз, корунд, наждак, гранат, кварц, креміль, крокус – окис заліза та ін.) і штучні (синтетичний алмаз, ельбор – нітрид бору, електрокорунд, карбід кремнію, карбід бору, окис алюмінію).

При виготовленні абразивних матеріалів породи дроблять на окремі зерна. Кожне зерно являє собою кристалічний осколок твердого матеріалу і є “мікрорізцем”, а ребра зерен – крайкою, що ріже. При русі зразка по поверхні абразивного матеріалу крайки зерен, що ріжуть, знімають з нього шар металу. Чим крупніше зерно, тим більший шар металу знімається за один прохід.

Готові абразивні матеріали складаються з зерен різних розмірів, тобто містять різні за розміром фракції: граничну, велику, основну, комплексну та дрібну. Абразивний матеріал характеризується номером зернистості, що зв’язаний з розміром зерен основної фракції.

Шліфування і полірування зразків можна вести абразивним матеріалом (порошками, пастою), абразивним інструментом (шліфувальні кола, бруски, шліфувальна шкірка).

Для шліфування і полірування металу як абразивний матеріал можна застосовувати і спеціальні пасти. Найбільш уживана паста хромоалюмінієва та алмазна. Ці пасти складаються з порошків (діючих як абразив), жирів, що зв’язують і поверхнево-активних речовин, які хімічно впливають на поверхню оброблюваного металу.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Плоску поверхню готують на торцевій поверхні зразка. Зразок обробляють на обертовому шліфувальному кругові або обпилюють напилком.

При великій швидкості обертання шліфувального кола підготовку поверхні ведуть з охолодженням зразка і з малим натиском. Перегрів зразка і сильний механічний вплив можуть викликати зміну мікроструктури, що приведе до помилкового результату дослідження. Отримана поверхня повинна бути плоскою і не мати завалів.

При ручному способі шліфування на тверду плоску підкладку (товсте скло чи лист металу), розташовану горизонтально, кладуть наждачний папір.

Потім зразок ставлять на папір зоторцьованою площиною і шліфують з легким натиском. Шліфування ведуть до повного знищення рисок, що залишилися після торцювання. Коли на шліфі залишаються риси тільки від паперу, шліфування переривають. Залишки абразиву видаляють з підкладки і шліфа, протираючи їх шматком чистої м'якої тканини. Після цього операцію шліфування повторюють на папері з більш дрібним зерном. При повторному шліфуванні напрямок руху зразка повинен бути перпендикулярно напрямку рисок, що залишилися від першого шліфування. Операції шліфування повторюють, використовуючи послідовно папір з меншим номером зернистості і щоразу змінюючи напрямок руху шліфа на 90°. Зміна напрямку руху шліфа дозволяє цілком знищити риси, що залишилися після попереднього шліфування. Закінчивши шліфування на папері з найдрібнішим зерном, зразок промивають проточною водою і полірують.

Після завершення шліфування на поверхні шліфа залишаються тонкі риси. Щоб остаточно вирівняти поверхню, шліф полірують до дзеркального блиску.

Шліф механічним способом полірують на полірувальному станку. Над полірувальним станком прикріплюють бак для полірувальної рідини, яка через тонку трубку з краном подається на полірувальний круг. Круг покривають м'якою тканиною: сукном, шовком та ін. Чим м'якіший метал, який поліруємо, тим тонша повинна бути будова тканини.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Мікроструктура металів і сплавів характеризується величиною зерна і розташуванням його, формою, розміром, кількістю різних фаз. Від цих факторів залежать фізико-механічні властивості сплавів.

Мікроструктуру сплавів вивчають під мікроскопом (три різних збільшення) на добре підготовлених шліфах. Для виявлення мікроструктури сплавів застосовують наступні методи: хімічне травлення, електролітичне травлення, магнітний метод, теплове травлення в розплавлених солях, катодне травлення, посилення рельєфу мікроструктури після об'ємних перетворень.

Різні фази сплаву відрізняються хімічним складом, кристалічною будовою, механічними властивостями, тому в основі всіх цих методів лежить вибір умов, що допомагають виявити розходження фаз і відрізнити їх одна від одної.

Для виявлення мікроструктури застосовують спеціально підібрані кислоти і луги різної концентрації, розчини різних солей і їх суміші, різні сполуки електролітів, нагрівання до різної температури на повітрі чи в спеціальному середовищі газів, нагрівання до визначених температур при пропусканні електричного струму. На поверхні шліфа відбувається розчинення одних фаз, окислювання і фарбування інших. У результаті цього на шліфі під мікроскопом можна побачити обриси зерен і різних фаз, визначити їхнє взаємне розміщення; за кольором, формою і розмірами визначити присутні в сплаві фази, тобто виявити мікроструктуру сплаву.

Для виявлення мікроструктури сплавів проводять хімічне травлення, тобто поверхню шліфа піддають дії хімічного реактива протягом певного часу. Є декілька способів травлення: занурення зразка у травник, втирання травника в поверхню шліфа і змочування поверхні шліфа травником.

Перед даною операцією шліфи знежирюють спиртом, а після нанесення травника на поверхню промивають водою, дотримуючись вимог техніки безпеки та охорони праці [13].

Тривалість травлення залежить від хімічного складу сталі і термічної обробки, концентрації травника і його хімічної активності, від збільшення при

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

якому буде проводитись дослідження (чим більше збільшення, тим менша тривалість процесу) і коливається від декількох секунд до декількох хвилин. зазвичай травники застовують при кімнатній температурі. Але для прискорення процесу їх підігрівають до деякої температури, в залежності від складу.

Якість травлення перевіряють під мікроскопом. Якщо поверхня шліфа під мікроскопом дуже світла, немає чіткості контурів структури, то шліф недотравлений і проводять повторне травлення. Якщо ж поверхня темна з широкими темними границями структурних складових, то шліф перетравлений. В цьому випадку його полірують і повторно травлять.

Після закінчення травлення, щоб уникнути окислення шліфа, його очищають від залишків травника і продуктів травлення спиртом і просушують.

Мікроскопічний аналіз полягає в дослідженні структури за допомогою оптичного та електронного мікроскопа. Мікроаналіз дозволяє визначити форму і розміри окремих зерен і фаз, а також їх вміст, виявити наявність в металі певних включень.

Для дослідження структури використовують мікроскопи МІМ-10, що дозволяє виконувати фотографування. Він широко застосовуються при проведенні металографічних робіт, так як дозволяє зафіксувати зображення різних об'єктів контролю і дослідження. Для фіксування мікроструктури на мікроскопах змонтовані спеціальні фотокамери або використовуються мікрофотонасадки.

До об'єктів, які підлягають мікрофотографуванню, ставлять підвищені вимоги. Поверхня шліфа повинна бути плоскою, а краї без завалів, тому що завалені краї дають спотворене уявлення про стан структури і особливо в тих випадках, коли досліджується глибина цементованого або знеуглецьованого шарів. На шліфі не повинно бути рисок і подряпин, так як вони розсіюють світло і заважають чіткому сприйняттю структури.

Для одержання якісного знімка необхідно в процесі фотографування виключити різного роду зовнішні впливи на мікроскоп. Всі дії з мікроскопом

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

проводять плавно без поштовхів. Підготовлений шліф закріплюють на столику мікроскопа, встановлюють потрібне збільшення, змінюючи об'єктив, і після дослідження певної ділянки фотографують.

2.3. Термічна обробка зразків сталі 70Г

Термічна обробка сталевих куль для розмолу, які зазвичай виготовляються зі середньо чи високовуглецевої або легованої сталі, включає аустенітизацію (нагрівання до 830 °С), гартування у воді для утворення мартенситу та низькотемпературне чи середнє відпускання (150...470°С). Цей процес підвищує твердість поверхні (часто >55 HRC) для зносостійкості, зберігаючи при цьому внутрішню в'язкість для запобігання поломкам.

Процес термічної обробки пружинної сталі в основному включає гартування та середньотемпературний відпуск. Загальновідомо, що температури гартування та відпуску безпосередньо впливають на міцність та пластичність пружинної сталі. Температура аустенітизації може впливати на розмір зерна, кількість карбідів та частку меж зерен з великими кутами. Під час процесу відпуску мартенситна структура відновлюється, тоді як залишковий аустеніт розкладається, а розмір, кількість та розподіл карбідів у сталі змінюються. Крім того, навіть невеликі зміни у складі сплаву можуть змінити параметри обробки оптимальної термічної обробки. Тому необхідно дослідити процес термічної обробки сталі 70Г для помольних куль, щоб оптимізувати процес промислового виробництва.

Доцільно розробити режим термічної обробки гартуванням та відпуском, відповідно врахувати вплив різних умов термічної обробки на мікроструктуру та механічні властивості обраної сталі. Метою цього дослідження є уточнення оптимального процесу термічної обробки для цього типу пружинної сталі за цього типу виробу – помольної кулі отриманої гарячим штампуванням. Оптимальний режим буде встановлений на основі порівняння структури та властивостей експериментальних зразків, щоб вони

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

могла мати як найвищу поверхневу твердість, так і в'язкість для майбутнього застосування у барабанних млинах.

Високотемпературна ділянка режиму призначена для розчинення карбідів під час процесу аустенітизації шляхом витримування аустеніту біля критичної температури перетворення, щоб отримати більш однорідні та дрібні частинки другої фази, тим самим покращуючи ударну в'язкість без шкоди для міцності. Тому контроль меж зерен з великими кутами шляхом регулювання процесу термічної обробки може бути важливим способом підвищення в'язкості пружинної сталі.

Кулі для подрібнення працюють у важких умовах зносу. Різні напруження, що виникають під час операції подрібнення, можуть спричинити знос матеріалу, швидкість якого залежить від типу матеріалу або процесу виробництва. Як наслідок, ці численні напруження можуть змінити життєвий цикл матеріалу. Термічна обробка є рекомендованим рішенням для покращення зносостійкості куль для подрібнення. Вона сприяє виділенню бажаних мікроструктурних фаз і, як наслідок, кращим механічним властивостям. Метою цієї роботи є вивчення впливу температури аустенітизації на структуру та властивості кованих сталевих куль зі сталі 70Г, призначених для подрібнення сировини в цементній промисловості. В дослідженнях використовуються три температури аустенітизації: 830 °С, 850 °С, 870 °С та 890 °С. Отримані результати пов'язують вплив температури термічної обробки та прикладеної сили на трибологічну поведінку досліджуваних зразків. У відповідності до такого плану досліджень був розроблений режим експериментальної термічної обробки (рисунок 2.2).

У розробці режиму нагрівання зразків сталі до температури аустенізації враховували технологічні особливості процесу гарячого штампування сталей, а саме практичні дані щодо температурні втрати металу під час пластичного формування в штампах. Відомо [8], що для двохперехідних процесів процесів формування з наступною обрізкою заусенця, температура сталі може втрачати 250...300 °С від початкової температури нагріву під штампування 1150 °С.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

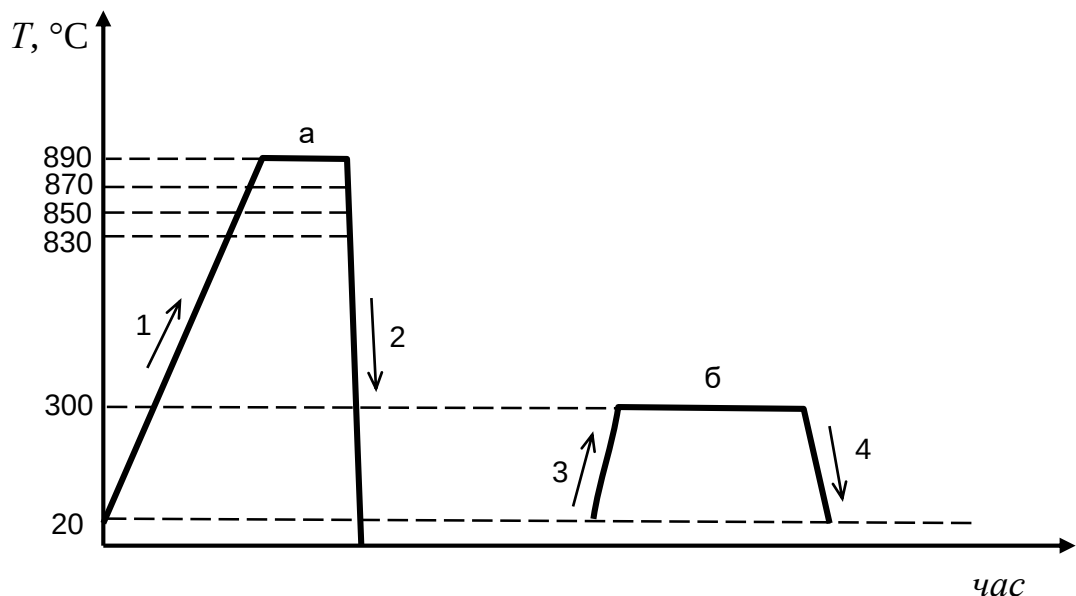


Рисунок 2.2 – Режим експериментальної термічної обробки сталі 70Г:

1 – нагрівання; 2 – охолодження в воді (гартування); 3 – нагрівання; 4 – охолодження на повітрі; а – витримка (до 0,5 години); б – відпускання (0,5...1,0 години).

Час витримки за критичних температур приймали мінімально допустимий для високовуглецевої сталі 70Г з приведеним умовним розміром виробу до 100 мм.

2.4. Методи оцінки механічних властивостей зразків

Одним із широко розповсюджених видів випробування металів являється визначення твердості. Твердість – це здатність матеріалу чинити опір місцевому пластичному деформуванню [11]. За значенням твердості металу можна скласти уявлення про рівень його властивостей. Наприклад, чим вища твердість, яка визначена вдавленням наконечника, тим менша пластичність, і навпаки.

Метод вимірювання твердості має ряд переваг перед іншими методами механічних випробувань металу: простота техніки і швидкість випробувань,

простота форми та невеликі розміри зразків, можливість проводити випробування на виробі без його руйнування.

Твердість визначаємо на спеціальному приладі – твердомірі, який забезпечує можливість регулювання параметрів (сили, часу) втискання наконечника вздовж його осі перпендикулярно до поверхні матеріалу.

Загальна схема випробувань така: зразок поміщаємо на робочому столі, за допомогою навантажуючого пристрою в зразок вдавлюється індентор і після зняття навантажень визначають твердість.

Існують загальні вимоги до підготовки зразків і проведення випробувань:

а) поверхня зразка повинна бути чистою, без оксидних плівок, тріщин та ін. дефектів;

б) зразки повинні бути певної товщини; після нанесення відбитка на другій стороні зразка не повинно бути слідів деформації;

в) зразок повинен лежати на столику жорстко, не зміщуватись і не прогинатись;

г) навантаження повинно діяти перпендикулярно до поверхні зразка;

д) навантаження повинно зростати плавно до заданого значення і підтримуватись постійним протягом певного часу.

При визначенні твердості за Роквелом в досліджуване тіло вдавлюється алмазний конус з кутом при вершині 120° (при дослідженні твердості дуже твердих матеріалів) або сталева загартована кулька діаметром 1,588 мм (при дослідженні м'яких матеріалів). Конус або кулька вдавлюється при прикладенні двох наступних навантажень: попередньої ($P=10$ кгс) і основної. Сумарне навантаження для шкали В складає 100 кгс, для шкали С – 150 кгс, для шкали А – 60 кгс. Шкала А застосовується при дослідженні дуже твердих матеріалів.

Твердість за Роквелом встановлюється в умовних одиницях. За одиницю твердості прийнята величина, що відповідає осьовому переміщенню індентора на 0,002 мм.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Твердість підготовлених зразків з помельних куль визначали на твердомірі NOVOTEST ТС-БРВ. Даний прилад є універсальним та забезпечує можливість регулювання параметрів вимірювання, зокрема, сили та часу втискання наконечника вздовж його осі перпендикулярно до поверхні матеріалу. Загальна методика вимірювання на цьому твердомірі полягає у наступному: зразок поміщаємо на робочому столі, за допомогою навантажуючого пристрою в зразок втискається індендор і після зняття навантажень індикаторний прилад твердоміру показує значення твердості.

Незважаючи на простоту вимірювань на цьому твердомірі, під час роботи слід дотримуватись загальних вимог щодо підготовки зразків та виконання вимірювань:

- а) на поверхні зразка не повинно бути слідів окислення, тріщин, вм'ятин, глибоких подряпин та інших дефектів;
- б) зразки мають мати достатню товщину (більше 5 мм);
- в) зразок повинен лежати на столику жорстко, не зміщуватись і не прогинатись;
- г) навантаження на зразок повинно спрямовуватись строго перпендикулярно до його поверхні.

Недоліком вимірювання твердості є те, що показникам твердості не вдається встановити достатньо достовірні характеристики пластичності матеріалу.

2.5. Методи засоби обробки результатів досліджень

Проби і заготовки відбираємо холодним способом на металорізальних верстатах. Враховуючи, що експериментальні зразки виготовлятимуться із високовуглецевої кремністої сталі 70Г, відрізання проб і заготовок необхідно проводити обережно. При виготовленні зразків повинні бути передбачені всі заходи, щодо запобігання зразків від нагріву і наклепу котрі можуть привести до спотворення структури та зміни властивостей.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Для проведення всього комплексу експериментальних досліджень виготовляємо 10 зразків, з необхідними розмірами та об'ємом. За рекомендаціями зразки повинні мати призматичну чи циліндричну форму, а площу поверхні, що вивчається неменше 1...2 см². Вибираємо циліндричну форму зразків, розміри яких (діаметр-висота): 20×10 мм.

Підвищення точності вимірювань досягається через регулярне калібрування приладів, використання інструментів з меншою ціною поділки, багаторазові вимірювання для обчислення середнього значення, мінімізацію впливу зовнішнього середовища (температура, вібрації) та цифрову обробку даних. Також застосовують структурні методи, такі як автоматична корекція похибок.

Основні способи підвищення точності вимірювань:

- калібрування та юстування: Регулярна перевірка та налаштування приладів для усунення систематичних похибок, викликаних старінням компонентів;
- вибір правильного інструменту: Використання приладів з меншою ціною поділки та вищим класом точності;
- багаторазові вимірювання: Проведення серії вимірювань (5...10 разів) з наступним обчисленням середнього арифметичного значення для зменшення випадкових похибок;
- усунення зовнішніх впливів: Створення стабільних умов (температура, вологість, відсутність вібрацій).

Методичні покращення експериментальних досліджень та обробки результатів:

Метод заміщення: порівняння вимірюваної величини з еталонною.

Диференціальний метод: вимірювання не самої величини, а її різниці з відомою.

Цифрова обробка (програмні методи): використання алгоритмів для фільтрації шумів та компенсації похибок за допомогою ПЗ.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Людський фактор: правильне розташування очей відносно шкали приладу (перпендикулярно).

Використання цих методів дозволяє мінімізувати як систематичні, так і випадкові похибки, забезпечуючи достовірність результатів.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

РОЗДІЛ 3

СТРУКТУРА ПОМОЛЬНИХ КУЛЬ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

3.1. Структура та властивості прокату сталі 70Г

Поковки помольних куль млинів зі сталі 70Г виготовляються гарячим об'ємним штампуванням на кривошипному механічному пресі. Як інструмент для формування початкової заготовки застосовують трьохпозиційний штамп з рівчаками для формування потрібної форми та розмірів кулі. У якості заготовок під штампування використовують сталевий металопрокат квадратного перерізу, який нарізається на мірні частини відповідно до необхідної ваги кулі. Для номінального діаметру кулі 62,0 мм, у відповідності до завдання, її вага для сталі 70Г буде становити:

$$m_k = \gamma_{ст} \cdot (V_k + V_в) = 7830 \cdot 0,17 \cdot \pi \cdot 0,062^3 (1 + 1/5) = 1,19 \text{ кг},$$

де m_k – маса кулі;

$\gamma_{ст}$ – густина сталі 70Г (7830 кг/м³);

$V_з$ – об'єм заготовки ($0,17\pi d_k^3$);

$V_в$ – об'єм відходу метала ($V_з / 5$).

Гаряче штампування сталевих куль із призматичних (квадратних або прямокутних) заготовок – це ефективний метод обробки металу тиском, що дозволяє отримувати вироби високої міцності та точної геометричної форми. Заготовки нагрівають до температури кування (зазвичай 1050...1250 °С), що робить метал пластичним та значно знижує зусилля, необхідні для деформації.

Гаряча деформація покращує структуру металу (сплющує зерна), підвищуючи механічні властивості. Призматичні заготовки для штампування куль млинів (рисунок 3.1) застосовують тому що їх легше та дешевше підготувати, ніж круглі.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 3.1 – Призматична заготовка (а) для гарячого штампування, та гарячештамовані помольні кулі (б), номінальним діаметром 60 мм

Для виготовлення заготовок на виробництві застосовують гарячекатаний прокат сталі 70Г квадратного січення. У гарячекатаному стані структура складається з сорбіту відпуску або суміші перліту та фериту (рисунок 3.2), що забезпечує твердість більше середньої для відпалених високовуглецевих сталей. За структурою ця сталь відноситься до евтектоїдних або близько доевтектоїдних, оскільки вміст вуглецю наближається до 0,8%.



x100



x600

Рисунок 3.2 – Структура прокату сталі 70Г у стані поставки

Дослідження структури гарячекатаного прокату сталі 70Г при великих збільшеннях оптичного мікроскопу дозволило виявити наявність сульфідних неметалевих включень (рисунок 3.3).



Рисунок 2.3 – Форма неметалевих включень в
гарячекатаному прокату сталі 70Г (x1000)

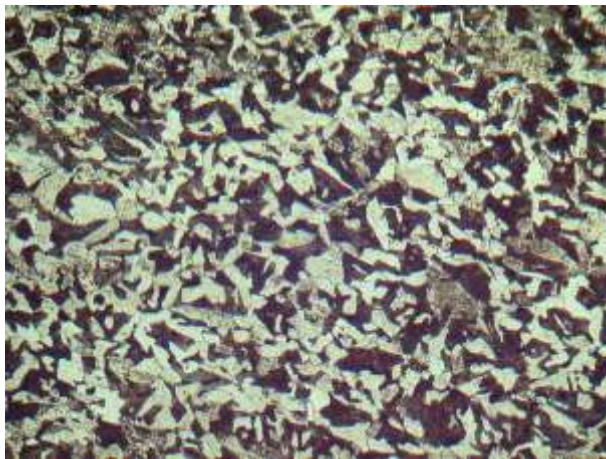
Спостереження показують, що сульфідні включення мають витягнуту форму. Це вказує на їх спотворення під час прокатування, за чим можна оцінити напрямок прокатування. Таке явище слід враховувати під час проектування процесів кування чи гарячого штампування. Необхідно уникати формування шарування структури в напрямку дії у деталі та виробих сколюючих напружень. Це дозволить покращити умови експлуатації деталей, підвищить їх стійкість, або ж дозволить зменшити металомісткість виробів.

3.2. Вплив гарячого штампування на структуру куль

Вироби, що отримують об'ємним гарячим штампуванням називають поковками. Поковку для однієї та тієї ж деталі (кулі, корпуси, важелі, шатуни, шестерні, фланці плоскі чи воротники, фланці посудин та апаратів, заглушки фланцеві, поворотні заглушки, вали, цапфи тощо) можна отримати обома кування та штампування, проте точність поковок буде різною. За об'ємного штампування поковка являє собою по суті, відбиток рівчка. Інструмент при об'ємному штампуванні є спеціалізованим, тобто призначений для деталей одного найменування, наприклад сталева куля для млина. Форма та розміри поковки максимально наближені до форми та розмірів кулі, для отримання якого, необхідно лише незначна механічна обробка. Зокерма для поковок помельних куль після гарячого штампування застосовується лише обрізування

облойного заусенця, а традиційні способи механічної обробки взагалі не застосовуються.

Гаряче штампування поковок помельних куль здійснюється за температур, вищих за температуру рекристалізації сталі 70Г, і після закінчення обробки тиском метал має рекристалізовану структуру з рівноважними зернами без слідів зміцнення. Як відомо гаряче штампування впливає на структуру сталей. Цей вплив тим сильніший, чим більший ступінь деформації початкової заготовки. Основні зміни стосуються врівноваження структури прокату сталі 70Г (рисунок 3.4).



x100



x600

Рисунок 3.4 – Структура поковок помельних куль

Як видно з аналізу структури сталі 70Г після гарячого штампування в основному об'ємі металу кулі спостерігається рівномірна ферито-перлітна структура. Така структура досягається завдяки одночасно триваючим процесам механічно деформаційного наклепування та рекристалізації.

3.3. Поверхнева твердість штампованої кулі

Оскільки помольні кулі працюють в умовах тертя, то для них характерне абразивне зношування. Абразивними матеріалами в даному випадку є мінерали природного або штучного походження (руда, вугілля тощо), зерна яких мають достатню твердість і здатність до різання. Абразивне зношування

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

пов'язане з руйнуванням поверхні помольної кулі в результаті ударно-абразивної взаємодії її поверхні з твердими частинками. До таких частинок відносяться незакріплені частинки, які входять в контакт з поверхнею кулі. Це насипні маси в об'ємі кульового млина.

Величина абразивного зношування деталей залежить, в основному, від твердості поверхні і абразивних частинок. Для мінімального зносу деталей їх твердість повинна перевищувати твердість абразиву на 60 %.

Для сталевих куль діаметром 60 мм були проведені дослідження по вимірюванню твердості. Твердість вимірювалась за Роквелом в чотирьох діаметрально протилежних місцях на поверхнях обох куль. Для цього на поверхні кулі шліфувались спеціальні площадки (рисунок 3.5). На кожній площадці робилося чотири вимірювання. Враховуючи похибку твердоміра середні значення цих замірів наведені в таблиці 3.1.



Рисунок 3.5 – Вимірювання поверхневої твердості куль

Згідно отриманих даних результатів вимірювання поверхневої твердості штампованих поковок помольних куль видно, що твердість має середні значення для високовуглецевих сталей після гарячого штампування. Більші значення твердості спостерігаються у зонах, що були розташовані біля формування облойного заусенця під час гарячого штампування.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання поверхневої твердості куль

Номер кулі	Значення твердості на поверхні HRC				Середнє значення HRC
	1	2	3	4	
1	32	31	38	32	33
2	30	31	28	33	31
3	33	32	29	30	31
4	28	29	31	31	30
5	33	35	34	37	34
6	34	32	38	36	35

Такі значення твердості характерні високовуглецевим низьколегованим сталям після поцесів кування чи штампування. Середні значення твердості на рівні 31...33 HRC не є критичними для поковок, які не вимагають виконання звичайних процесів механічної обробки, зокрема точіння, фрезерування, з використанням ріжучого інструменту. Після гарячого штампування поковки помельних куль піддають галтуванню та наступній термічній обробці, без обробки на металорізальних верстатах.

3.4. Оцінка об'ємної твердості за січенням кулі

Об'ємна твердість визначена у двох взаємно перпендикулярних напрямках на темплетях, вирізаних з центральної частини кулі, поверхня яких підготовлена згідно з вимогами ДСТУ 9012 та ДСТУ 9013 за формулою:

$$OT = 0,289T_{нов} + 0,436T_{0,25} + 0,203T_{0,5} + 0,063T_{0,75} + 0,009T_{\psi};$$

$$OT = 25,78 \text{ HRC};$$

де: $T_{нов}$, $T_{0,25}$, $T_{0,5}$, $T_{0,75}$, T_{ψ} – значення твердості на відстані від поверхні в частинах радіуса 0,25, 0,5 та 0,75 в напрямку до центру кулі (T_{ψ}).

Для порівняння значень твердості по об'єму побудований графік (рисунок 3.6), з якого видно, що перепад твердості для помельних куль є невеликим. Це обумовлено тим, що куля $d=50\text{мм}$ виготовлена зі сталі 60Г, в якій в якості легуючого елементу присутній марганець. Завдяки марганцю твердість по об'єму кулі розподіляються рівномірно.

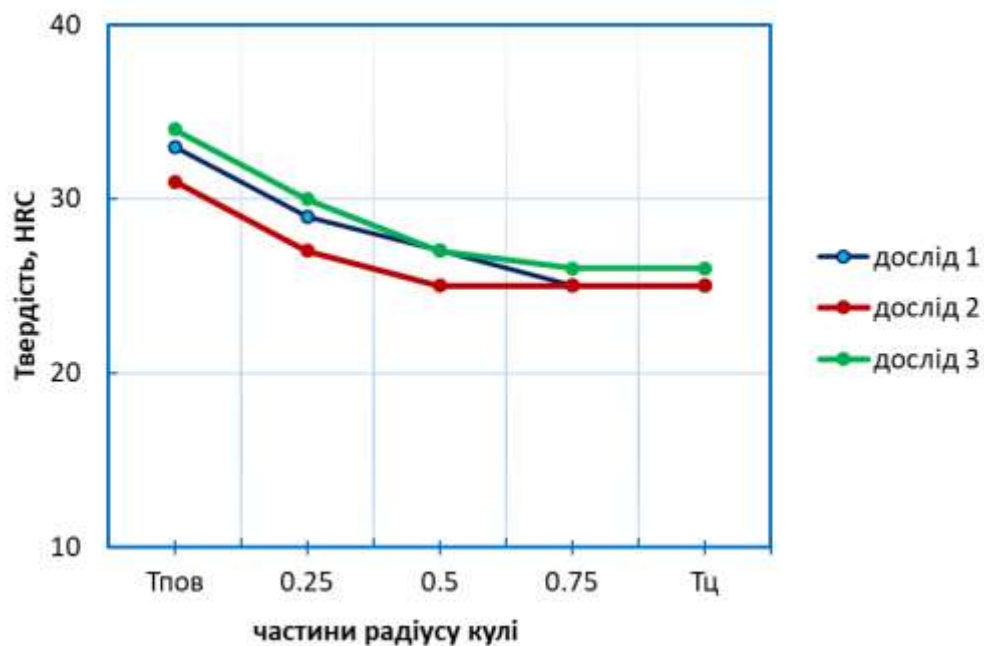


Рисунок 3.6 – Залежність твердості поковки кулі за її січенням по радіусу кулі, від поверхні ($T_{пов}$) до центру ($T_{ц}$)

Для отримання результатів поковку помольної кулі розрізали навпіл та по радіуси проводили вимірювання твердості. При цьому застосовували спеціальні підставки під сферичну поверхню кулі.

В середній чи центральній частині твердість сталі 70Г має менші значення. Це викликано меншими спотвореннями структури поковки в цих об'ємах металу. В перефрійних зонах сталь має більші значення твердості, до 30 HRC, що пов'язано з більшою інтенсивністю пластичної деформації. Проте, більший вплив на такий розподіл твердості чинить прискорене охолодження металу кулі під час пластичного формування у штампі. Контактуючи з холодними стінками штамп метал кулі швидше охолоджується, що формує в поверхневих шарах кулі залишкові напруження.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ГАРТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОМОЛЬНИХ КУЛЬ

4.1. Особливості гартування сталі 70Г з використанням струмів високої частоти

Для забезпечення потрібних експлуатаційних характеристик сталевих помольних куль барабанних млинів, їх піддають зміцнюючій термічній обробці. Для куль отриманих гарячим штампуванням найчастіше застосовують гартування у воді чи оливах. Температура гартування має важливе значення оскільки забезпечує відповідні структурні складові, що забезпечують потрібну твердість, в залежності від марки сталі.

Важливи також є спосіб нагрівання куль та час витримки за температур гартування. Для помольних куль виготовлених з високовуглецевих конструкційних низьколегованих сталей, зокрема сталі 70Г, доцільно застосовувати способи, що формують гартівні структури у поверхневих шарах куль. Це обумовлено головним чином необхідністю забезпечення регламентованих значень твердості згідно стандарту на поверхні куль, яка є робочою та характеризує власне експлуатаційну стійкість кулі. Наскрізне гартування куль, що мають діаметр більше 50 мм є недоцільним, адже інтенсивні ударні навантаження для них менші, в порівнянні з кулями з більшим діаметром, та русі яких в роторних барабанних млинах виникають більші сили інерції. Відповідно, наскрізне гартування куль великого діаметру небезпечне їх розколюванням при ударах, бо вони мають більшу масу. Крім того, наскрізне загартування таких куль є технологічно ускладненим та вимагає тривалих витримок, що може викликати появу явища знеуглецевлення поверхні кулі. Отже, більш ефективним та практичним способом гартування середніх та великих помольних куль є гартування з використанням струмів високої частоти, що пришвидчує процес та спрощує технологію.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Гартування помольних куль з використанням способу нагріву струмами високої частоти (СВЧ) – це сучасний метод поверхневої термічної обробки, що використовує індукційне нагрівальне обладнання для підвищення твердості і зносостійкості поверхневого шару кулі, при збереженні в'язкої серцевини.

Принцип дії нагрівання ТВЧ полягає в тому, що через індуктор (котушку) пропускається змінний струм високої частоти, який створює електромагнітне поле. Це поле викликає вихрові струми (струми Фуко) у поверхневому шарі кулі, миттєво нагріваючи його до температур загартування, зазвичай вище точки A_3 . Через високу частоту струму виникає скін-ефект, тобто нагрівання відбувається не по всьому об'єму, а переважно в поверхневому шарі, що дозволяє отримати тонкий, але дуже твердий загартований шар.

В роботі нагрів зразків помольних куль здійснювали в звичайному циліндричному індукторі високочастотного нагрівача (рисунок 4.1). У виробничих умовах доцільно організувати послідовний безперервний нагрів куль в одному прохідному, чи декількох канальних індукторах з примусовим переміщенням куль по вогнетривкому жолобу. Такий спосіб забезпечить більш рівномірний нагрів, а швидкістю переміщення куль по жолобу можна регулювати температуру та ступінь прогріву куль.

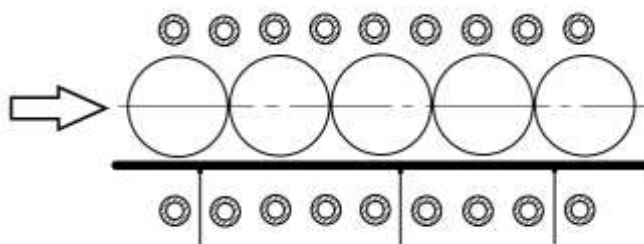


Рисунок 4.1 – Нагрівання куль в індукторі СВЧ

Після нагрівання слідує швидке охолодження куль в загартованому середовищі. Зазвичай це вода або спеціальні полімерні розчини. Швидке охолодження у воді фіксує тверду структуру мартенситу сталі. В результаті

кулі набувають високої твердості поверхні (HRC 50...60), що забезпечує опір зносу, і ударну в'язкість серцевини, яка запобігає розколюванню при експлуатації в барабанних млинах.

В процесі виконання дослідів фіксували температуру кулі під час нагрівання. Температуру вимірювали портативним високотемпературним пірометром UNI-T UT305C в режимі інфрачервоного випромінювання. Час нагріву становив 20...25 хвилин для забезпечення прогріву серцевини кулі та досягнення температури на поверхні, що фіксувалась пірометром у межах 830 °C, 850 °C, 870 °C та 890 °C. Підвищення температури від номінальної температури гартування 830 °C для сталі 70Г, сприяє більшому прогріву кулі вглиб від поверхні за швидкісного нагрівання СВЧ.

Після охолодження куль від різних температур у воді проводили низьке відпускання з нагрівом у камерній електричній печі до температури 300 °C. Після стабілізації температури кулі витримували в печі протягом 0,5 години та охолоджували на спокійному повітрі.

4.2. Вплив гартування на макроструктуру гарчештампованих куль

Для дослідження макроструктури загартованих помольних куль їх розрізали навпіл та готували макрошліфи з одної половинки кулі. Шліфування виконували ретельно, поступово зменшуючи зернистість шліфувального паперу. Під час розрізання кулі та виконання шліфування слідкували за температурою металу у робочійзоні, недопускаючи його надмірного нагрівання, яке може вплинути на структурні зміни.

Макроструктурний стан металу кулі досліджували після глибокого травлення поверхні макрошліфа (рисунок 4.2). Дослідженнями встановлено, що починаючи від температури нагріву

Як видно з фотографії макроструктури після гартування в об'ємі кулі формується прогартована зона, що розміщена на поверхні та простирається у глибину кулі приблизно на 2/3 радіусу кулі. Такий стан загартованих куль зі

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

сталі 70Г, діаметром 60 мм, є задовільним та відповідає вимогам стандарту та умовам роботи помольних куль у барабанних млинах.



Рисунок 4.2 – Макроструктура помельних куль після гартування у воді

Враховуючи, що програтована зона кулі буде мати вищу твердість, обробка з використанням нагріву струмами високої частоти, забезпечить достатню стійкість поверхневих шарів куль в процесі роботи у барабанних млинах. З іншого боку непрогатована серцевина для куль діаметром більше 50 мм, буде гарантувати достатній запас в'язкості. Відповідно помельні кулі будуть стійкими проти об'ємного крихкого розколювання за виникнення потужних ударів одна відносно одної в процесі роботи млина.

4.3. Мікроструктура загатованих куль після відпуску

Для дослідження мікроструктури помольних куль готувались мікрошліфи, що були вирізані з характерних зон. Мікрошліви вирізали по радіусу в глиб, щоб захопити всі характерні зони, що формуються в процесі гартування. Важливим було дослідити структуру на поверхні кулі та зміну її характеру за глибиною аж до центральних зон кулі.

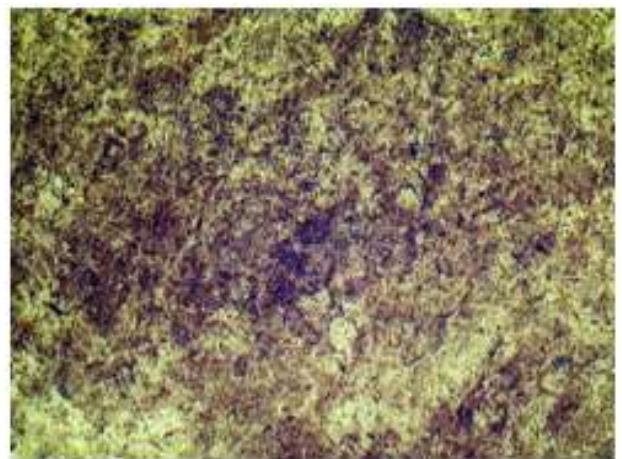
Мікроструктуру підготовлених мікрошліфів спочатку вивчали при невеликому збільшенні мікроскопу (рисунок 4.3). На отриманих фрагментах структури поверхневого шару куль та її серцевини видно відмінності

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурного стану сталі. на поверхні спостерігається рівномірний фон з темним травленням, який зазвичай характерний для структур відпущеного мартенситу гартування високовуглецевих сталей. При підвищенні температури гартування структура відпущеного мартенситу стає більш грубішою та нерівномірною. Особливо це помітно для температури 890 °С. Проте, отримані дані свідчать, що незначне підвищення температури гартування сталі 70Г від номінальної, зокрема до 850 °С, мало впливає на зміну структурних особливостей загартованої сталі.



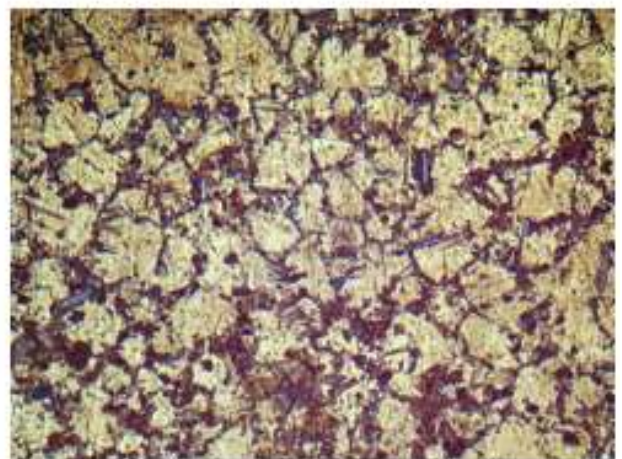
830 °С



850 °С



870 °С



890 °С

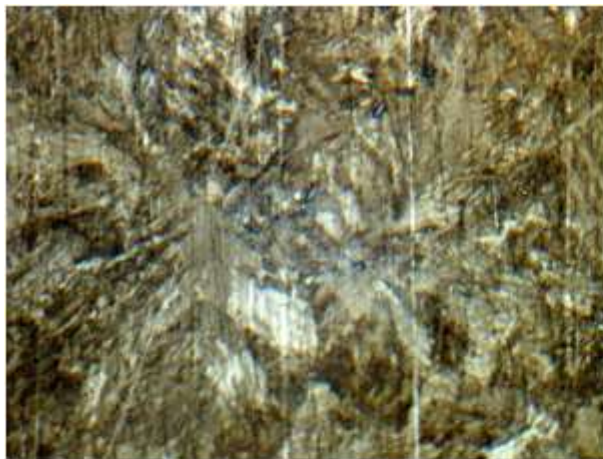
Рисунок 4.3 – Мікроструктура поверхні куль після гартування від різних температур після відпуску. Збільшення мікроскопу x100

Встановлено що значне підвищення температури від номінальної погіршує структуру поверхні куль. В структурі зразків загартованих від

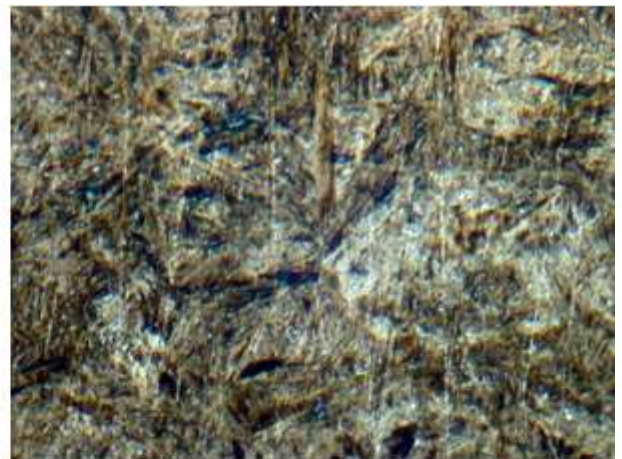
					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури 890 °С фіксували появу границь зерен високотемпературного аустеніту.

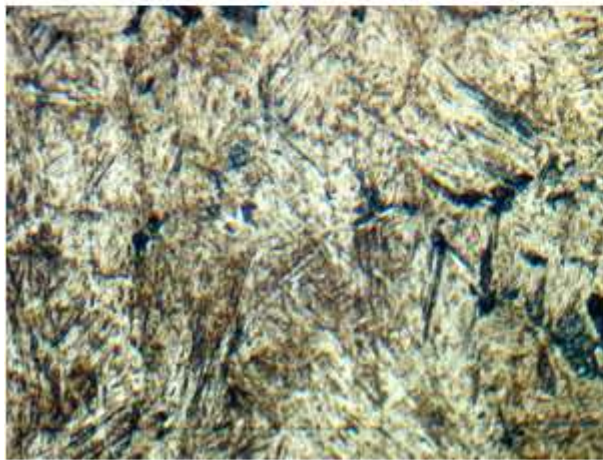
При дослідженні структури куль за великих збільшень мікроскопу встановлено, що мікроструктура куль на поверхні (рисунок 4.4) після гартування переважно складається з паралельно розташованого рейкового мартенситу.



830 °С



850 °С



870 °С



890 °С

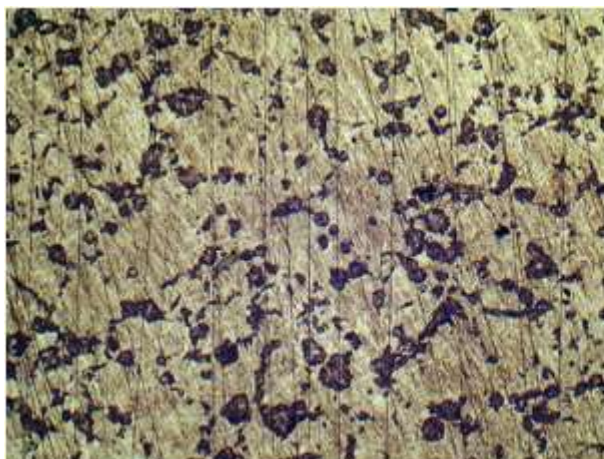
Рисунок 4.4 – Мікроструктура поверхні куль після гартування від різних температур після відпуску. Збільшення мікроскопу x600

Зі збільшенням температури аустенітизації розташування рейок поступово стає паралельним, ширина та довжина збільшуються. Це пояснюється тим, що зі збільшенням температури енергія термічної активації в сталі збільшується, що робить атоми вуглецю більш активними для швидшої дифузії зсередини зерен до меж зерен, що стимулює ріст зерен аустеніту. Крім

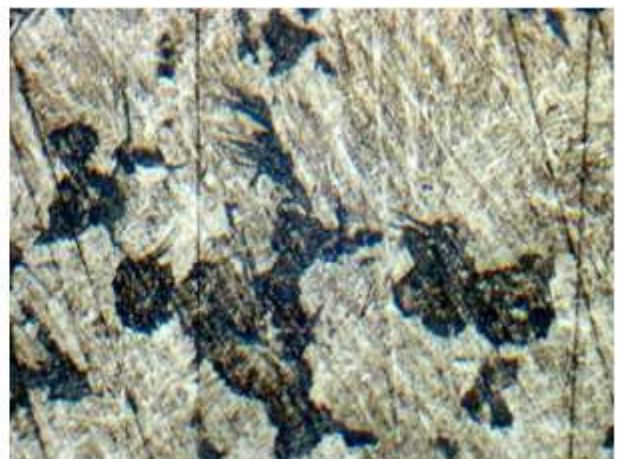
того, рушійною силою мартенситного перетворення є різниця вільної енергії між старою та новою фазами. Тому, зі збільшенням температури нагрівання, ступінь переохолодження, що утворюється під час гартування, збільшується. Результуюча рушійна сила зародження збільшується, що призводить до швидшого фазового перетворення; таким чином, розмір рейок збільшується, а міцність зменшується. Крім того, залишковий аустеніт є м'якою фазою, і збільшення вмісту його зон в структурі сталі також зменшить міцність зразків, загартованих за високої температури.

Після відпуску структура в основному зазнає відновлення мартенситу, карбідоутворення та розкладання залишкового аустеніту. Як добре відомо, дислокації високої щільності в мартенситі відновлюються під час процесу відпуску, і їх кількість зменшується. Зі збільшенням температури відпуску ступінь відновлення дислокацій збільшується, тим самим знижуючи границю текучості матеріалу.

Структура серцевини куль практично не зазнала змін, проте при високих температурах нагрівання під гартування (рисунок 4.5) в структурі сталі з'являються троосто мартенситні поля. Їх поява викликана розпадом мартенситу гартування.



x100



x600

Рисунок 4.5 – Мікроструктура серцевини куль після гартування від температури 890 °C та відпуску

4.4. Вплив температури гартування на твердість помольних куль

Твердість після гартування та відпуску помольних куль вимірювали за методом Роквелла. Вимірювання виконували як на поверхні кулі за описаною методикою, так і на вирізаних зразках, що отримували розрізанням куль навпіл. На вирізаних зразках можна було оцінити зміну твердості від поверхні у глиб кулі, до її центральної зони.

За результатами оцінки твердості доцільно побудувати залежності, які б одночасно показували зміну твердості HRC по радіусу кулі (рисунок 4.6), та в залежності від прийнятих температур гартування: 830 °С, 850 °С, 870 °С та 890 °С.

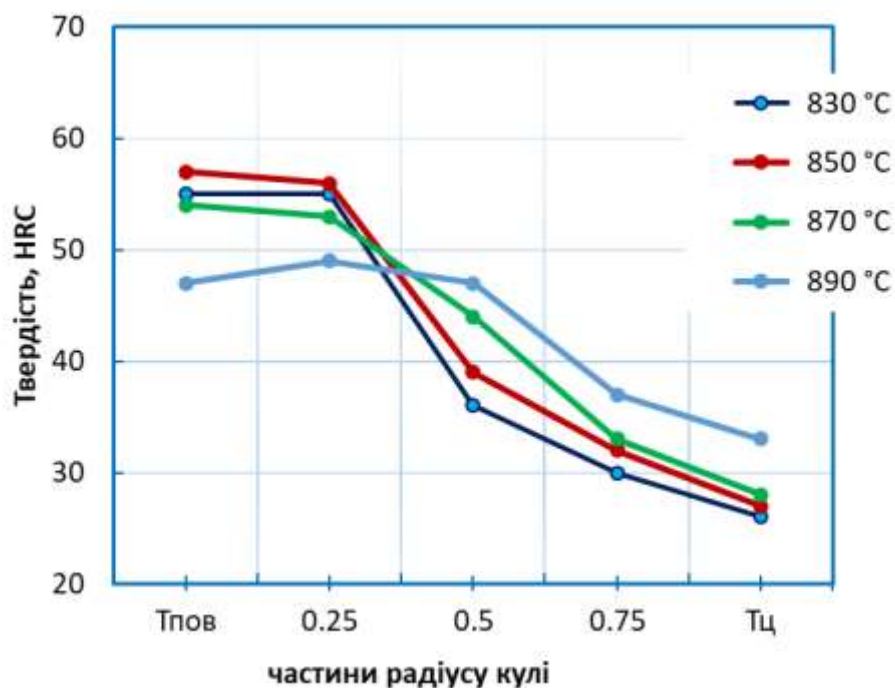


Рисунок 4.6 – Розподіл твердості помольних куль зі сталі 70Г по радіусу кулі для різних температур гартування

Як видно з отриманих результатів вимірювання твердості та їх розподілу за об'ємом матеріалу кулі, найвищу твердість мають поверхневі шари куль. Найвища твердість сталі 70Г властива кулям, що гартувались від температури 850 °С, що на 20 °С вища від номінальної за стандартом. Таке явище можна пояснити застосуванням високошвидкісного нагрівання з використанням

струмів високої частоти. Досягнення більшої температури сприяє більш повному проходженню структурної перебудови, а також підвищує інтенсивність дифузійних процесів, та розчинення атомів вуглецю у гамма залізі. Більше насичення аустеніту атомами вуглецю дозволяє, в процесі прискореного охолодження у воді, сформувати перенасичені структури мартенситу з більшою твердістю.

Важливим параметром помельних куль є їх твердість на поверхні. Як видно з рисунку 4.7 максимальна твердість за значеннями HRC характерна для температури гартування 850 °С.

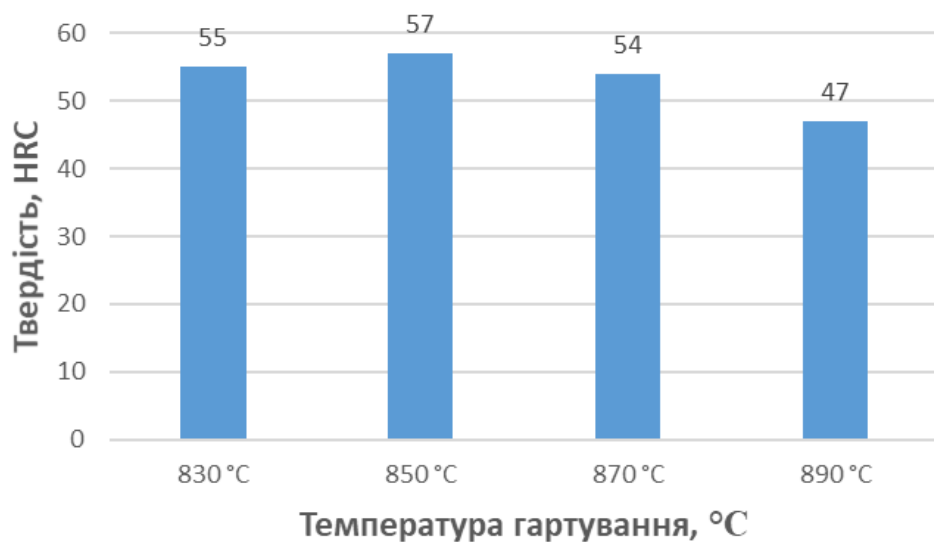


Рисунок 4.7 – Твердість на поверхні помельних куль

Підвищення температури гартування хоч і забезпечує більше розчинення вуглецю в аустеніті сталі 70Г, проте значення твердості поверхні нижчі. Таке явище можна пов'язати з інтенсифікацією процесів зневуглецювання поверхні, тому що при СВЧ нагрівання більші температури вимагають більш тривалого нагріву, до 30 хвилин. Також підвищення температури активує атоми вуглецю, які взаємодіючи з повітрям вигаряють за вищих температур. Таким чином більш оптимальною температурою гартування штампованих помельних куль зі сталі 70Г слід вважати температуру 850 °С.

4.5. Розробка рекомендацій щодо оптимізації процесу гартування помольних куль зі сталі 70Г

При використанні в якості матеріалу для помольних куль з конструкційної високовуглецевої сталі 70Г, необхідно застосовувати такі технології термообробки, які дають можливість отримання в поверхневих шарах виробів структури відпущеного мартенситу. Опір зношування цієї структури зростає у міру збільшення вмісту вуглецю, у зв'язку з чим при виборі матеріалу слід орієнтуватися на сталі евтектоїдного складу. Подальше зростання концентрації вуглецю в сталях доцільне лише для отримання в структурі необхідної кількості залишкового аустеніту за рахунок розчинення карбідів при нагріванні під загартування; наявність вторинних карбідів знижує опір мартенситної матриці спрацюванню за умов ударного помолу в барабанних млинах.

Як показує аналіз результатів дослідження структури та твердості помольних куль з конструкційної високовуглецевої сталі 70Г більша твердість поверхні досягається при гартуванні гарячештампованої заготовки кулі від температури 850 °С. Дана температури оптимальна для куль діаметром 60 мм, та за умов швидкісного індукційного нагрівання СВЧ. Як охолоджуюче середовище рекомендується застосовувати воду або водяні розчини солей з незначною концентрацією.

Після гартування рекомендується проводити відпускання за невисоких температур 250...300 °С для отримання структури відпущеного мартенситу. За таких умов отримується висока твердість поверхні, близько 55 HRC, та кулі за вимогами норм стандарту відповідають 4 групі за твердістю. Це забезпечить достатню стійкість штампованих помольних куль в умовах ударно-абразивної роботи барабанних кульових млинів, що широко застосовуються для подрібнення та виготовлення будівельних сумішей.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі проведені дослідження процесу гартування з використанням нагріву струмами високої частоти помольних куль та на основі аналізу отриманих результатів встановлено вплив температури гартування на структуру та властивості штампованих помольних куль зі сталі 70Г. Розроблено рекомендації щодо застосування високошвидкісного нагрівання з використанням СВЧ в процесі гартування помольних куль, виготовлених зі сталі 70Г.

Розроблено методику експерименту та вибрані методи дослідження, що дозволяють встановити достовірні дані впливу температури гартування на структуру та твердість помольних куль, заготовки яких отримані способом гарячого штампування.

Досліджено макро- та мікроструктури сталевих заготовок до термічної обробки і куль, що пройшли термічну обробку. Встановлено, що гартування та низьке відпускання суттєво змінює структуру поверхні сталевих куль. Зона гартування за нагріву з використанням СВЧ може простягатись у глиб кулі на глибину $\frac{2}{3}$ її радіусу. При підвищенні температури гартування ця зона збільшується.

В роботі на основі аналізу результатів досліджень встановлено вплив гартування на структуру та властивості помольних куль, діаметром 60 мм. В поверхневих шарах куль формується мартенситні структури, зокрема, мартенсит відпуску. Твердість поверхні куль з такою структурою відповідає оптимальним значенням 53...57 HRC, що є нормованими для стандартних куль 3 та 4 групи твердості.

В роботі проведено оптимізацію процесу нагріву куль перед гартуванням з використанням СВЧ. Встановлено, що оптимальною температурою нагріву для штампованих помольних куль, виготовлених з конструкційної сталі 70Г, є температура 850 °С. Як охолоджуюче середовище рекомендується застосовувати воду. Після гартування

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

рекомендується проводити відпускання за невисоких температур 250...300 °С для отримання структури відпущеного мартенситу. Це забезпечить достатню стійкість штампованих помольних куль в умовах ударно-абразивної роботи барабанних кульових млинів, що широко застосовуються для подрібнення та виготовлення будівельних сумішей.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машины та обладнання підприємств: навч. Посібник / М.Г. Залоюбовський, В.В. Малишев. – К.: Університет «Україна», 2020. – с.
2. Рудопомольні апарати самоподрібнення (млини і дезінтегратори) : Навчальний посібник / М.І. Сокур, В.С. Білецький, Д.П. Божик, С.В. Чоботарьов. – Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2023. – 252 с.
3. М.І. Сокур, В.С.Білецький. Барабанні млини самоподрібнення / Монографія. – К.: ФОП Халіков Р. Х. – 2022. - 225 с.
4. The study of the lining layer abrasing wear in the semi-autogenous grinding mill / Mykola Sokur, Volodymyr Biletskyi, Mykhailo Fyk, Oleksandr Fyk and Igor Zaselskiy / E3S Web Conf. Volume 166, 2020. ICSF 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603008>.
5. Покращення характеристик кульового млина як керованого об'єкта в процесі рудопідготовки / В. О. КОНДРАТЕЦЬ, А. М. МАЦУЙ, О. М. СЕРБУЛ, Р. В. ТИХИЙ // Вісник Херсонського національного технічного університету. № 2(85) (2023). С. 37-43. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.4>.
6. ДСТУ 8538:2015 Кулі молотильні сталеві для кульових млинів. Технічні умови / Нац. стандарт України. – Вид. офіц. – [чинний від 2016-07-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 17 с.
7. ДСТУ 8429-2015 Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови / Нац. стандарт України. – Вид. офіц. – [чинний від 2017-07-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 16 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. Металознавство: навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

10. Вакуленко І.О. Теорія і практика термічної обробки : конспект лекцій. – Кам'янське: ДДТУ, 2024. – 121 с.

11. Методи структурного аналізу матеріалів : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр спеціальності 132 Матеріалознавство / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Г. Г. Лобачова, Є. В. Іващенко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 180 с.

12. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальностей 132 "Матеріалознавство" всіх форм навчання / уклад.: Імбірович Н.Ю. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – 36 с.

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

					БР 1126.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53